



TUGAS AKHIR - MO 141326

**ANALISIS *PIPELINE WALKING* PADA PIPA BAWAH LAUT  
AKIBAT *TENSION STEEL CATENARY RISER***

Doddy Novrianto

NRP. 4312 100 044

DOSEN PEMBIMBING :

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

Jurusan Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2016



**FINAL PROJECT - MO 141326**

**PIPELINE WALKING ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINE DUE TO  
TENSION CREATED BY STEEL CATENARY RISER**

**Doddy Novrianto**

**NRP. 4312 100 044**

**SUPERVISORS :**

**Ir. Imam Rochani, M.Sc.**

**Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.**

**Department of Ocean Engineering**

**Faculty of Marine Technology**

**Institute of Technology Sepuluh Nopember**

**Surabaya**

**2016**

**ANALISIS PIPELINE WALKING PADA PIPA BAWAH LAUT AKIBAT  
TENSION STEEL CATENARY RISER**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

**Doddy Novrianto**

NRP.4312100044

Disetujui Oleh :

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

(Pembimbing 1)

2. Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

(Pembimbing 2)

3. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

(Penguji 1)

4. Yoyok Setyo Hadiwidodo, S.T., M.T., Ph.D.

(Penguji 2)

5. Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M.Sc.

(Penguji 3)

6. Wimala Lalitya Dhanistha, S.T., M.T.

(Penguji 4)

SURABAYA, JULI 2016

**ANALISIS *PIPELINE WALKING* PADA PIPA BAWAH LAUT AKIBAT  
*TENSION STEEL CATENARY RISER***

Nama : Doddy Novrianto  
NRP : 4312100044  
Jurusan : Teknik Kelautan FTK – ITS  
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.  
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

**ABSTRAK**

Kebutuhan industri minyak dan gas yang semakin hari semakin meningkat menuntut teknologi yang canggih untuk dapat melakukan eksplorasi dan eksploitasi. Eksplorasi yang dilakukan dewasa ini sudah memasuki perairan dalam, dimana salah satu sistem transportasi minyak dan gas yang sering digunakan adalah pipa bawah laut. Dalam pengoperasian pipa bawah laut ada berbagai hal yang harus dicermati agar tidak terjadi kegagalan. Pada tugas akhir ini, akan dibahas mengenai salah satu masalah yang sering timbul dalam pengoperasian pipa bawah laut yaitu *pipeline walking*. Akibat tekanan dan temperatur yang tinggi pada saat pengoperasiannya (*start up*) menyebabkan pipa dapat berkespansi, namun akibat adanya gaya tahanan yang melawan gaya ekspansi sehingga pipa bawah laut tidak dapat kembali pada posisi semula ketika dilakukan maintenance (*shut down*). Ada beberapa faktor yang mempengaruhi terjadinya *pipeline walking* yaitu gradien termal sepanjang pipa, kemiringan seabed, dan *tension steel catenary riser*. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai *walking per cycle* akibat *tension steel catenary riser* yaitu sebesar 0,078 m tiap siklusnya. Selain itu akan dibahas mengenai besarnya tegangan maksimal pada pipa tanpa dipengaruhi oleh *tension steel catenary riser* dan dipengaruhi oleh *tension steel catenary riser* yaitu secara berurutan sebesar 337,59 MPa dan 347,35 MPa. Sedangkan untuk displasmen maksimal yang terjadi pada pipa tanpa dipengaruhi oleh *tension steel catenary riser* sebesar 0,014231 m dan yang dipengaruhi oleh *tension steel catenary riser* sebesar 0,015202 m.

**Kata Kunci:** displasmen, pipa bawah laut, *pipeline walking*, *shut down*, *start up*, tegangan, *tension steel catenary riser*.

# **PIPELINE WALKING ANALYSIS OF SUBSEA PIPELINE DUE TO TENSION CREATED BY STEEL CATENARY RISER**

Name : Doddy Novrianto  
NRP : 4312100044  
Department : Teknik Kelautan FTK – ITS  
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.  
Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

## **ABSTRACT**

The increasing needs of oil and gas industries require high technology for doing exploration and exploitation. Nowadays, the exploration has reached to deep sea, which often to use subsea pipeline for its transportation system. There are many aspects to be concerned about in subsea pipeline operation to overcome pipeline failure. This thesis will discuss about the phenomenon of pipeline walking which can lead to pipeline failure. Due to high temperature and pressure during start up phase, the pipeline can expand nevertheless as a result of frictional resistance which is directionally against expansion force, thus the pipeline can not back to the initial position in shut down phase. There are many factors that affect the occurrence of pipeline walking, such as thermal gradient along pipeline, the seabed slope, and tension created by steel catenary riser. The objective of this thesis is to get the value of walking per cycle due to tension created by steel catenary riser equal to 0,078 m per cycle. Furthermore, this thesis will discuss about the maximum stress of the pipeline which is not affected by tension of steel catenary riser and is affected by tension of steel catenary riser that has value respectively 337,59 MPa and 347,35 MPa. Whereas the displacement along the pipeline which is not affected by tension of steel catenary riser and is affected by tension of steel catenary riser that has value respectively 0,014231 m and 0,015202 m.

**Key Word:** displacement, pipeline walking, shut down, start up, stress, subsea pipeline, tension steel catenary riser.

## DAFTAR ISI

|  |            |
|--|------------|
| <b>HALAMAN JUDUL .....</b>   | <b>i</b>   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>   | <b>ii</b>  |
| <b>ABSTRAK .....</b>   | <b>iii</b> |
| <b>ABSTRACT .....</b>  | <b>iv</b>  |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>   | <b>v</b>   |
| <b>UCAPAN TERIMA KASIH .....</b>   | <b>vi</b>  |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>   | <b>vii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>  | <b>ix</b>  |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>  | <b>x</b>   |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>   | <b>xii</b> |
| <b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 Latar Belakang .....   | 1          |
| 1.2 Perumusan Masalah .....  | 3          |
| 1.3 Tujuan .....   | 3          |
| 1.4 Manfaat .....  | 3          |
| 1.5 Batasan Masalah .....  | 3          |
| 1.6 Sistematika Penulisan .....  | 4          |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>                            | <b>5</b>   |
| 2.1 Tinjauan Pustaka.....  | 5          |
| 2.2 Dasar Teori.....   | 6          |
| 2.2.1 Desain <i>Pipeline</i> .....   | 6          |
| 2.2.2 <i>Heat Transfer</i> .....   | 7          |
| 2.2.3 Ekspansi <i>Pipeline</i> .....   | 7          |
| 2.2.4 <i>Pipeline Walking</i> .....  | 8          |
| 2.2.5 <i>Submerged Weight</i> .....  | 10         |
| 2.2.6 Regangan <i>End Cap</i> .....  | 12         |
| 2.2.7 Regangan <i>Poisson</i> .....  | 13         |
| 2.2.8 Regangan Temperatur .....  | 13         |
| 2.2.9 Tahanan Gesek.....   | 14         |
| 2.2.10 <i>Virtual Anchor Point (VAP)</i> .....                                 | 14         |
| 2.2.11 Spektra Gelombang.....  | 15         |
| 2.2.12 <i>Response Amplitude Operator (RAO)</i> .....                          | 17         |
| 2.2.13 Pengaruh <i>Steel Catenary Riser</i> pada <i>Pipeline Walking</i> ..... | 18         |
| 2.2.14 Laju Walking per Siklus .....   | 19         |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....</b>                            | <b>23</b> |
| 3.1 Metodologi Penelitian .....                                       | 23        |
| 3.2 Pengumpulan Data .....  | 27        |
| 3.2.1 Data <i>Pipeline</i> .....                                      | 27        |
| 3.2.2 Data Lingkungan .....   | 28        |
| 3.2.3 Data Fluida .....   | 29        |
| 3.2.4 Data <i>Riser</i> .....   | 29        |
| <b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....</b>                           | <b>31</b> |
| 4.1 Umum .....  | 31        |
| 4.2 Pemodelan <i>Heat Transfer</i> .....                              | 32        |
| 4.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa .....                             | 37        |
| 4.4 Perhitungan Regangan .....  | 38        |
| 4.5 Perhitungan Tahanan Gesek Tanah .....                             | 39        |
| 4.6 Perhitungan Letak <i>Virtual Anchor Point</i> .....               | 40        |
| 4.7 Pemodelan Semi-Submersible .....                                  | 42        |
| 4.8 Karakteristik Gerak Semi-Submersible Pada Gelombang Reguler ..... | 43        |
| 4.8.1 Gerakan Translasional .....                                     | 43        |
| 4.8.2 Gerakan Rotasional .....  | 45        |
| 4.9 Respon Gerak Semi-Submersible Pada Gelombang Acak .....           | 48        |
| 4.9.1 Gerakan Translasional .....                                     | 48        |
| 4.9.2 Gerakan Rotasional .....  | 50        |
| 4.10 <i>Tension Steel Catenary Riser</i> .....                        | 52        |
| 4.11 <i>Walking per Cycle</i> .....                                   | 53        |
| 4.12 Analisis Tegangan dan Displasmen .....                           | 55        |
| 4.12.1 Kondisi pada Analisis Tegangan dan Displasmen .....            | 55        |
| 4.12.2 Analisis Kondisi 1 .....                                       | 56        |
| 4.12.3 Analisis Kondisi 2 .....                                       | 60        |
| 4.12.4 Analisis Kondisi 3 .....                                       | 65        |
| <b>BAB V PENUTUP .....</b>  | <b>67</b> |
| 5.1 Kesimpulan .....  | 67        |
| 5.2 Saran .....   | 68        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>   | <b>69</b> |
| <b>LAMPIRAN</b>   |           |
| <b>BIODATA PENULIS</b>  |           |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1 Amplitudo dan Tinggi Gelombang pada Spektrum.....                 | 15 |
| Tabel 3.1 Data <i>Pipeline</i> .....  | 27 |
| Tabel 3.2 Data Lingkungan.....  | 28 |
| Tabel 3.3 Data Fluida.....  | 29 |
| Tabel 3.4 Data <i>Riser</i> .....   | 29 |
| Tabel 4.1 Hasil Perubahan Temperatur Sepanjang Pipa.....                    | 36 |
| Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Berat Terendam Pipa.....                        | 37 |
| Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Regangan ( <i>Hot End</i> ).....                | 38 |
| Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Regangan ( <i>Cold End</i> ).....               | 39 |
| Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Tahanan Gesek.....                              | 40 |
| Tabel 4.6 Perhitungan <i>Virtual Anchor (Hot End)</i> .....                 | 41 |
| Tabel 4.7 Perhitungan <i>Virtual Anchor (Cold End)</i> .....                | 41 |
| Tabel 4.8 Nilai RAO Maksimum.....   | 47 |
| Tabel 4.9 Hasil Simulasi Dinamis Tension SCR.....                           | 53 |
| Tabel 4.10 Perhitungan <i>Walking per Cycle</i> .....                       | 54 |
| Tabel 4.11 Kondisi pada Analisis Tegangan dan Displasmen.....               | 55 |
| Tabel 4.12 Tegangan Kondisi 1 (Tanpa <i>Tension SCR</i> ) .....             | 57 |
| Tabel 4.13 Validasi <i>Von Mises</i> (Kondisi 1) .....                      | 58 |
| Tabel 4.14 Displasmen pada Kondisi 1 (Tanpa <i>Tension SCR</i> ) .....      | 59 |
| Tabel 4.15 Tegangan Kondisi 2 ( <i>Tension SCR</i> = 323400 N).....         | 62 |
| Tabel 4.16 Validasi <i>Von Mises</i> (Kondisi 2) .....                      | 63 |
| Tabel 4.17 Displasmen pada Kondisi 2 ( <i>Tension SCR</i> = 323400 N) ..... | 64 |
| Tabel 4.18 Nilai <i>Tension</i> Kritis.....                                 | 66 |



## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 1.1 Konfigurasi <i>Steel Catenary Riser</i> dan <i>Pipeline</i> (Carr <i>et al</i> , 2003).....     | 2  |
| Gambar 2.1 Detail Aksial Displasmen pada Pipa (Tveramo, 2013).....   | 10 |
| Gambar 2.2 Ilustrasi lapisan beton pada pipa (Reza, 2008) .....  | 11 |
| Gambar 2.3 Potongan melintang pipa bawah laut (Reza, 2008).....  | 11 |
| Gambar 2.4 SCR dan Pipa Bawah Laut (Yoon, 2013) .....  | 18 |
| Gambar 3.1 Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir.....   | 24 |
| Gambar 4.1 Pemodelan Pipa Menggunakan Software Autocad 3D .....  | 33 |
| Gambar 4.2 Meshing Pipa Pada ANSYS 16.0.....   | 33 |
| Gambar 4.3 Hasil Analisis Perpindahan Panas .....  | 34 |
| Gambar 4.4 Kontur Temperatur Sepanjang Pipa.....   | 35 |
| Gambar 4.5 Letak <i>Virtual Anchor Point</i> .....   | 41 |
| Gambar 4.6 Pemodelan Semi-Submersible dengan Sistem Mooring dan Steel<br>Catenary Riser.....               | 42 |
| Gambar 4.7 Pemodelan Semi-Submersible dengan Sistem Mooring dan Steel<br>Catenary Riser (Tampak Atas)..... | 43 |
| Gambar 4.8 RAO <i>Surge</i> .....  | 43 |
| Gambar 4.9 RAO <i>Sway</i> .....   | 44 |
| Gambar 4.10 RAO <i>Heave</i> .....   | 44 |
| Gambar 4.11 RAO <i>Roll</i> .....  | 45 |
| Gambar 4.12 RAO <i>Pitch</i> .....   | 46 |
| Gambar 4.13 RAO <i>Yaw</i> .....   | 46 |
| Gambar 4.14 Grafik Spektra JONSWAP.....  | 48 |
| Gambar 4.15 Respon Spektra <i>Surge</i> .....  | 48 |
| Gambar 4.16 Respon Spektra <i>Sway</i> .....   | 49 |
| Gambar 4.17 Respon Spektra <i>Heave</i> .....  | 49 |
| Gambar 4.18 Respon Spektra <i>Roll</i> .....   | 50 |
| Gambar 4.19 Respon Spektra <i>Pitch</i> .....  | 51 |
| Gambar 4.20 Respon Spektra <i>Yaw</i> .....  | 51 |
| Gambar 4.21 Ilustrasi <i>Tension</i> Pada SCR.....   | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 4.22 Distribusi Pembebanan Kondisi 1 .....                                 | 56 |
| Gambar 4.23 Hasil <i>Von Mises</i> yang Terjadi Sepanjang Pipa (Kondisi 1) .....  | 57 |
| Gambar 4.24 Tegangan Maksimal ( <i>Von Mises</i> ) yang Terjadi (Kondisi 1) ..... | 58 |
| Gambar 4.25 Displasmen yang Terjadi sepanjang Pipa (Kondisi 1) .....              | 59 |
| Gambar 4.26 Displasmen Maksimal yang Terjadi (Kondisi 1) .....                    | 60 |
| Gambar 4.27 Distribusi Pembebanan Kondisi 2 .....                                 | 61 |
| Gambar 4.28 Hasil <i>Von Mises</i> yang Terjadi Sepanjang Pipa (Kondisi 2) .....  | 62 |
| Gambar 4.29 Tegangan Maksimal ( <i>Von Mises</i> ) yang Terjadi (Kondisi 2) ..... | 63 |
| Gambar 4.30 Displasmen yang Terjadi sepanjang Pipa (Kondisi 2) .....              | 64 |
| Gambar 4.31 Displasmen Maksimal yang Terjadi (Kondisi 2) .....                    | 65 |

## **DAFTAR LAMPIRAN**

LAMPIRAN A RAO DAN SPEKTRA RESPON

LAMPIRAN B PERHITUNGAN *WALKING PER CYCLE* , TEGANGAN, DAN  
DISPLASMEN

LAMPIRAN C *OUTPUT* ANALISIS TEGANGAN DAN DISPLASMEN KONDISI 1  
(ANSYS)

LAMPIRAN D *OUTPUT* ANALISIS TEGANGAN DAN DISPLASMEN KONDISI 2  
(ANSYS)

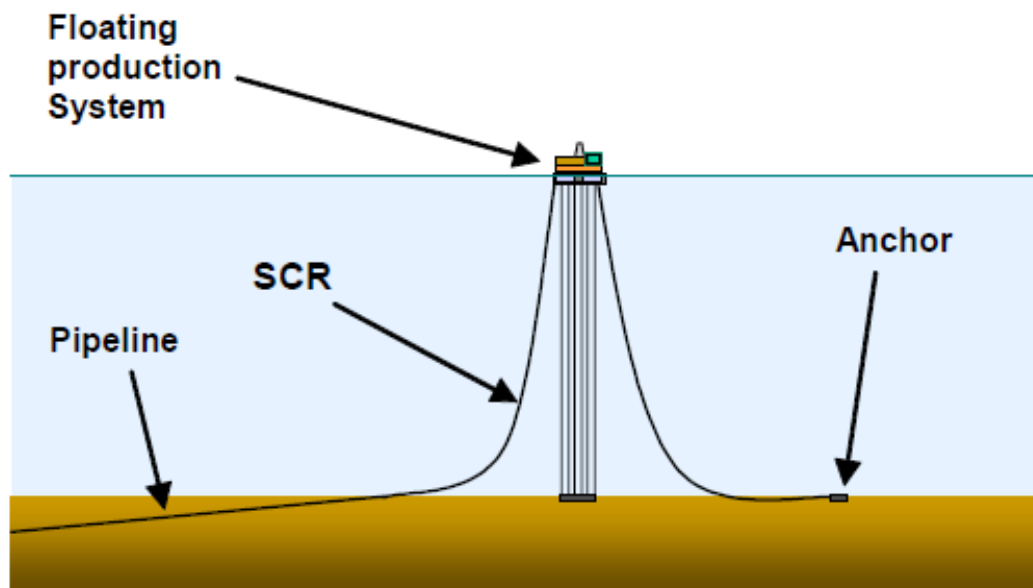
# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan teknologi pada industri minyak dan gas bumi semakin hari semakin meningkat. Eksplorasi yang dahulu dilakukan di darat (*onshore*) pada perkembangannya sudah menjangkau daerah lepas pantai (*offshore*), bahkan kondisi terkini eksplorasi dilakukan pada laut dalam. Ada berbagai sistem penyaluran minyak dan gas bumi dari sumur (*well*) menuju *receiver facility*, salah satunya dengan menggunakan *pipeline*. *Pipeline* digunakan untuk berbagai maksud dalam pengembangan sumber daya hidrokarbon di lepas pantai, termasuk pipa transportasi untuk ekspor, pipa penyalur untuk mengangkut produksi dari suatu *platform* ke pipa ekspor (Soegiono, 2007).

Pada industri *offshore pipeline* salah satu tantangan yang dihadapi berkaitan dengan tekanan dan temperatur *pipeline* yang tinggi pada saat *start-up* dan *shut-down* selama umur hidupnya (*lifetime*) (Tveråmo, 2013). Pada saat *start up* pipa akan mengalami pergerakan secara siklik dan aksial (ekspansi) menuju daerah *cold end* yang merupakan akhir dari pipa yang terletak dekat dengan *riser*. Sedangkan pada saat *shut down*, pipa akan mengalami penyusutan, namun karena adanya interaksi antara pipa dengan tanah berupa tahanan gesek, maka pipa tidak dapat kembali ke posisi semula. Fenomena ini berlangsung dalam beberapa siklus yang disebut sebagai *pipeline walking*.



**Gambar 1.1** Konfigurasi *Steel Catenary Riser* dan *Pipeline* (Carr *et al*, 2003)

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi tingkah laku *walking* antara lain:

- Gradien termal sepanjang pipa
- Kondisi dasar laut
- Kemiringan dasar laut
- *Tension* yang disebabkan oleh *steel catenary riser*

Seperti yang diketahui bahwa salah satu faktor yang mempengaruhi tingkah laku *walking* adalah *tension* yang disebabkan oleh *steel catenary riser*, maka tujuan penulisan tugas akhir ini adalah untuk menganalisis fenomena *pipeline walking* dan mengetahui pengaruh *tension steel catenary riser* terhadap terjadinya *pipeline walking*. Analisis awal yaitu dengan menghitung dan menentukan letak *virtual anchor point* (VAP) yang merupakan titik awal dimana pipa terjadi *walking*. Kemudian menghitung besarnya *axial walking* per siklus pada pipa akibat *tension* pada *steel catenary riser*.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dalam tugas akhir ini adalah :

1. Berapa besar perpanjangan pipa secara aksial (*walk per cycle*) dalam tiap siklus akibat *tension steel catenary riser* dan pengaruh termal?
2. Berapa besar tegangan dan displasmen yang terjadi pada pipa?

## 1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis berapa besar perpanjangan pipa secara aksial (*walk per cycle*) dalam tiap siklus akibat *tension steel catenary riser* dan pengaruh termal.
2. Menganalisis besar tegangan dan displasmen yang terjadi pada pipa.

## 1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan informasi mengenai besar perpanjangan pipa secara aksial (*walk per cycle*) dalam tiap siklus akibat *tension steel catenary riser* dan pengaruh termal.
2. Memberikan informasi mengenai tegangan dan displasmen yang terjadi pada pipa

## 1.5 Batasan Masalah

Untuk menghindari pembahasan diluar topik yang akan dikaji, maka dilakukan pembatasan masalah dengan asumsi – asumsi sebagai berikut :

1. *Codes* yang digunakan yaitu DNV OS F101
2. Pemodelan dan analisis perpindahan panas menggunakan *software* ANSYS
3. Pemodelan dan analisis tegangan pada pipa menggunakan *software* ANSYS
4. *Seabed* diasumsikan datar
5. Buckling diabaikan
6. Perhitungan hanya dibatasi pada perhitungan besar perpanjangan pipa secara aksial
7. Virtual anchor point tidak berpindah akibat adanya *walking*
8. Pemodelan *floater* telah dilakukan

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dari tugas akhir ini yaitu:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini menguraikan beberapa hal antara lain:

- a. Latar belakang
- b. Perumusan masalah
- c. Manfaat
- d. Tujuan
- e. Sistematika penulisan
- f. Batasan masalah

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini berisi tentang teori-teori yang digunakan dalam penyelesaian tugas akhir yang dikerjakan.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini menjelaskan langkah-langkah pengerjaan yang meliputi studi literature, pengumpulan data, pengerjaan, dan pemodelan.

### **BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN**

Bab ini berisi mengenai pembahasan dan pengerjaan tugas akhir. Dilanjutkan analisis melalui pemodelan pada *software*.

### **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan dari pengerjaan tugas akhir dan saran yang bermanfaat untuk penelitian selanjutnya.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1 Tinjauan Pustaka

Dewasa ini perancangan pipa bawah laut memiliki tantangan yang semakin kompleks terkait dengan pengoperasiannya yang menggunakan tekanan dan temperatur yang tinggi. Ada beberapa aspek teknis yang harus diperhitungkan untuk merancang pipa bawah laut. *Pipeline Walking* merupakan salah satu fenomena yang harus diperhitungkan untuk menghindari kegagalan dalam pipa bawah laut. *Pipeline walking* merupakan lanjutan dari peristiwa ekspansi pipa berupa pergerakan aksial pipa dari *hot end* menuju *cold end* yang merupakan akhir dari pipa (Rong *et al.*, 2009).

Pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Carr *et al.* (2003) dengan judul “*Lateral Buckling and Pipeline Walking A Challenge for Hot Pipelines*” mengatakan bahwa *tension* pada *riser* juga merupakan faktor lainnya yang dapat menyebabkan *walking behavior* dan bahkan dapat melebihi mekanisme termal transient. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Labib (2015) menganalisis *pipeline walking* akibat kemiringan seabed. Beberapa penelitian sebelumnya yang membahas tentang *pipeline walking* antara lain yang dilakukan oleh Isaac (2013) dengan judul “*Lateral Buckling and Axial Walking of Surface Laid Subsea Pipeline*”. Camilla Tveramo (2013) membahas tentang “*Pipeline Walking of High Pressure/Temperatur Flowlines*”. Se-Hoon Yoon membahas tentang “*Phenomenon of Pipeline Walking in High Temperatur Pipeline*”.

Pipa bawah laut membutuhkan tekanan dan temperatur yang tinggi dalam pengoperasiannya. Tantangan pada pipa bawah laut yang bertemperatur tinggi yang kadang-kadang diabaikan adalah *pipeline walking*. Fenomena *pipeline walking* ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain perpindahan termal atau adanya *tension* yang dihasilkan oleh *steel catenary riser*, yang dapat menyebabkan kegagalan pada *riser* tersebut.



## 2.2 Dasar Teori

### 2.2.1 Desain Pipeline

Dalam desain pipa terdapat beberapa faktor yang harus diperhatikan seperti kondisi pembebanan dan mekanisme kegagalan. Pipa yang terletak pada seabed memiliki tekanan internal akibat aliran fluida dalam pipa, tekanan eksternal akibat hidrostatik, beban temperatur, dan bending (Tveramo, 2013). Tekanan internal dalam pipa menyebabkan adanya *hoop stress* pada dinding pipa. Besarnya *hoop stress* diberikan dalam persamaan:

$$\sigma_h = (p_i - p_e) \frac{D-t}{2t} \dots\dots\dots(2.1)$$

dengan,

- $p_i$  = tekanan internal ( $\text{N/m}^2$ )
- $p_e$  = tekanan eksternal ( $\text{N/m}^2$ )
- $D$  = diameter (m)
- $t$  = tebal pipa (m)

Jika tegangan pada pipa mencapai *ultimate strength* dari material, maka pipa dapat meledak. Hal ini merupakan mekanisme kegagalan pada pipa akibat dari adanya tekanan internal. Jika tekanan internal eksternal pipa juga semakin bertambah maka akan menyebabkan adanya *local buckling* dan juga menyebabkan terjadinya kegagalan pada pipa.

Terdapat dua pendekatan dalam desain pipa yaitu, *allowable stress design* dan *limit state design*. *Allowable stress design* merupakan tegangan yang diperbolehkan terjadi pada struktur pipa. Untuk *limit state design* merupakan batas dari dimana struktur tersebut akan mengalami kegagalan jika menerima kelebihan beban.

Fenomena lain yang perlu dipertimbangkan dalam desain pipa adalah *pipeline walking*. *Pipeline walking* dapat menyebabkan terjadinya *lateral buckling* dan dapat merusak koneksi pada ujung pipa. Salah satu penyebab terjadinya *pipeline walking* adalah adanya perpindahan panas disepanjang pipa. Perpindahan panas ini akan dijelaskan pada bab selanjutnya.

### **2.2.2 Heat Transfer**

Ketika pipa dalam kondisi operasi, aliran fluida dalam pipa akan memanaskan *inlet* pipa hingga menuju *outlet* pipa. Pada waktu yang sama terdapat eksternal *heat loss* akibat adanya pengaruh dari suhu lingkungan. Sehingga suhu pada *outlet* pipa berbeda dengan *inlet* pipa. Jika pengaruh dari suhu lingkungan besar dan pipa merupakan pipa yang panjang, suhu pada *outlet* pipa menjadi *ambient temperatur* atau sama dengan kondisi lingkungan (Tveramo, 2013).

Perpindahan panas didefinisikan sebagai *steady state* dan *transient* tergantung kondisi yang terjadi pada pipa. Pada kondisi *steady state*, temperatur pada pipa tidak berubah seiring berjalannya aliran dari inlet menuju outlet. Jika pada saat kondisi *steady state* dilakukan perawatan pada pipa, temperatur aliran dalam pipa akan mengalami *cooling down*. Pada kondisi ini perpindahan panas menjadi transien. Aliran pada kondisi transien memiliki beberapa properti seperti *thermal conductivity*, massa jenis, dan *specific heat capacity*. Perpindahan panas secara transien ini mengakibatkan terjadinya ekspansi dan mengarah pada *pipeline walking* (Tveramo, 2013).

### **2.2.3 Ekspansi Pipeline**

Zat padat secara mikroskopis dapat dipandang dengan model atom-atom yang dihubungkan dengan pegas. Pegas-pegas tersebut bergerak dengan amplitude tertentu. Bila temperaturnya dinaikkan maka jarak antar atom-atom tersebut juga akan berubah. Begitu pula pada pipa bawah laut yang terletak pada *seabed*, kondisi bawah laut yang mempunyai temperatur rendah dapat menyebabkan pemuaian pada pipa karena temperatur fluida di dalam pipa yang tinggi (Tveramo, 2013).

Pada kondisi operasi pipa cenderung mengalami ekspansi menuju ujung akhir akibat dari adanya peningkatan temperatur dan tekanan pada pipa. Hasil dari adanya ekspansi ini, mengakibatkan tahanan gesek dari tanah dasar laut meningkat dan gaya aksial yang berlawanan dengan arah ekspansi semakin meningkat. Konsekuensinya, pipa mengalami gaya kompresif aksial efektif. Gaya

efektif ini akan terus meningkat dimulai dari ujung pipa menuju ujung akhir hingga mencapai keseimbangan.

Keseimbangan gaya antara gaya aksial dan tahanan gaya gesek tercapai tergantung dari besar kecilnya tahanan gesek dari seabed. Jika tahanan gesek tidak cukup untuk menahan pipa sepenuhnya pada tiap poin disepanjang pipa, maka pipa tersebut dinamakan pipa pendek. Dalam kasus ini keseimbangan gaya akan terbentuk dan disebut sebagai *virtual anchor point*. Jika diberikan gaya gesekan yang tetap disepanjang pipa, maka *virtual anchor point* pada pipa pendek terletak pada bagian tengah pipa. Namun jika terdapat tahanan gesek yang cukup, maka regangan yang dihasilkan akibat adanya tahanan gesek akan menahan regangan akibat adanya temperatur dan tekanan pada pipa. Dengan kata lain adanya tahanan gesek ini mencegah pergerakan pipa lebih lanjut dan pipa ini dinamakan pipa panjang. Dalam kasus ini *virtual anchor point* akan terletak di setiap zona ujung pipa. Sehingga pada saat pipa mengalami ekspansi termal, gaya ekspansi tersebut akan dilawan dengan tahanan gesek dari tanah dasar laut. Letak dari *virtual anchor* tersebut juga akan mempengaruhi arah ekspansi. Untuk lebih jelasnya akan dijelaskan pada bab selanjutnya.

#### **2.2.4 Pipeline Walking**

Sebagaimana yang dinyatakan dalam pendahuluan dan bab sebelumnya, *pipeline walking* adalah gerakan perpindahan secara aksial di sepanjang pipa akibat adanya ekspansi termal dan gaya gesek tanah serta adanya perubahan temperatur akibat perubahan siklus dari kondisi *start up* ke kondisi *shut down*.

Ketika pipa diletakkan di dasar laut dan dipanaskan oleh fluida panas yang mengalir dalam pipa, pipa cenderung berkembang, ekspansi tersebut ditentang oleh gaya gesekan yang dihasilkan dengan adanya kontak dengan dasar laut (Luciene Alves *et al*, 2012). Pada saat kondisi *shut down*, pipa mengalami penurunan tekanan dan suhu sehingga pipa mengalami penyusutan, dalam proses ini tahanan gesek akan meningkat dengan demikian menentang gerakan penyusutan pipa (Tveramo, 2013). Akibat adanya tahanan gesekan pada saat pipa

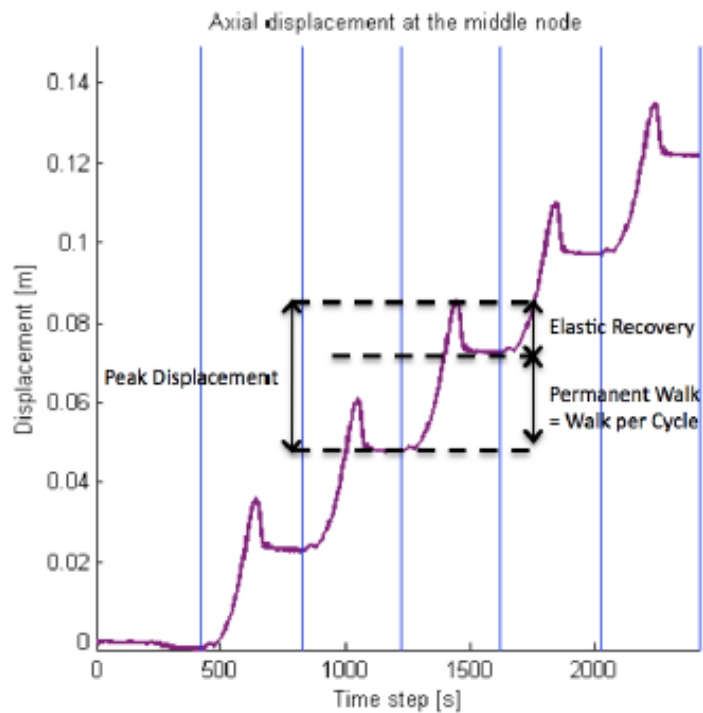
menyusut, hal ini menyebabkan pipa tidak dapat kembali ke posisi semula. Pada siklus *start up* dan *shut down* berikutnya pipa mengalami hal yang sama, hal ini menyebabkan akumulasi gerakan pipa dari *hot end* menuju *cold end*. Akumulasi dari gerakan pipa secara aksial ini disebut *pipeline walking*. Akumulasi dari gerakan ini dapat menyebabkan perpindahan yang signifikan pada pipa, dan dapat menyebabkan kegagalan pada koneksi akhir pipa seperti spool atau jumper.

Menurut Carr *et al* (2008) *pipeline walking* dapat menyebabkan:

- Tekanan yang berlebihan pada koneksi pipa seperti *spool / jumper*
- Hilangnya *tension* dalam *steel catenary riser*
- Menyebabkan *lateral buckle*
- Menyebabkan peningkatan tegangan karena *lateral buckle*

Dari pembahasan di atas dapat diketahui bahwa *pipeline walking* terjadi akibat adanya gaya gesekan tanah, ekspansi termal, perubahan suhu dari satu siklus (*start up* dan *shut down*) dan *tension* pada *steel catenary riser*. Berikut adalah faktor-faktor yang mempengaruhi terjadinya *pipeline walking*:

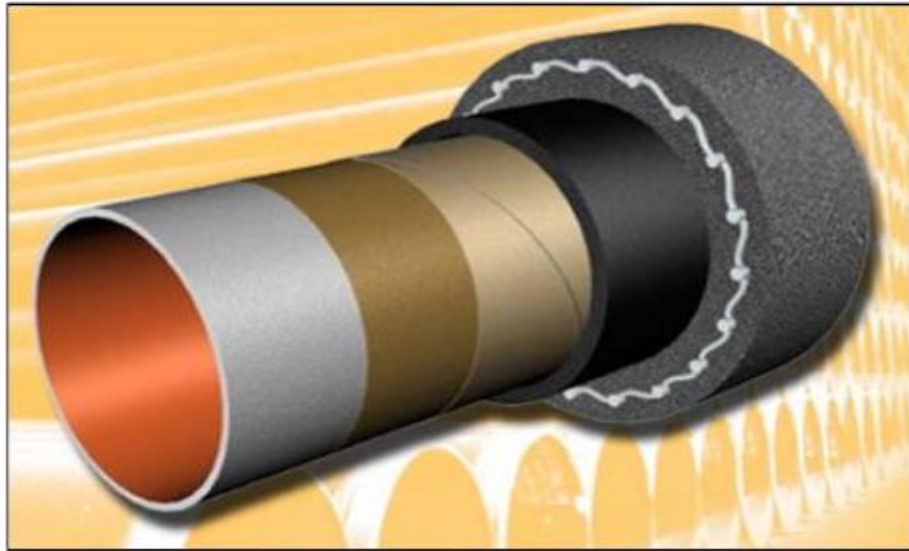
- Jenis tanah *seabed*
- Kemiringan dasar laut
- Perubahan termal sepanjang pipa
- *Tension* yang dihasilkan oleh *steel catenary riser* (SCR)



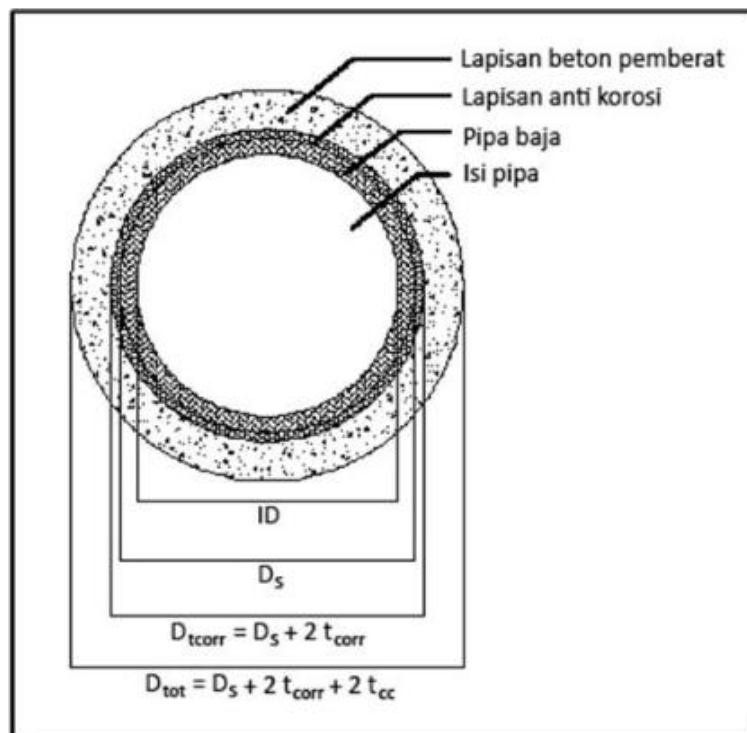
**Gambar 2.1** Detail Aksial Displasmen pada Pipa (Tveramo, 2013)

### 2.2.5 Submerged Weight

Struktur pipa bawah laut umumnya memiliki dua lapisan pelindung utama yaitu lapisan beton (*concrete coating*) dan lapisan pelindung korosi (*corrosion coating*). Lapisan beton berfungsi sebagai pemberat untuk menstabilkan pipa di bawah laut. Pemilihan ketebalan lapisan beton harus diperhitungkan dengan tepat. Karena, apabila terlalu tipis dan ringan, lapisan beton tidak akan mampu menjaga stabilitas pipa. Sebaliknya apabila lapisan beton terlalu tebal dan berat, maka akan mengakibatkan pemborosan dan terlalu berat untuk diinstal.



**Gambar 2.2** Ilustrasi lapisan beton pada pipa (Reza, 2008)



**Gambar 2.3** Potongan melintang pipa bawah laut (Reza, 2008)

Dalam menentukan letak *virtual anchor*, terlebih dahulu harus diketahui berapa berat pipa dalam keadaan terendam. Berat pipa dalam keadaan terendam akan mempengaruhi besarnya tahanan gesekan yang tercipta antara tanah dan pipa, sehingga sebelum menghitung besarnya regangan terlebih dahulu harus mengetahui besar dari berat pipa terendam. Berat pipa terendam dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$W_s = (M_s + M_{content} + M_{concrete}).g - B_f \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana,

|                |                       |                     |
|----------------|-----------------------|---------------------|
| $W_s$          | = berat terendam pipa | (N/m)               |
| $M_s$          | = massa baja          | (kg)                |
| $B_f$          | = gaya apung          | (N/m)               |
| $M_{content}$  | = massa konten        | (kg)                |
| $M_{concrete}$ | = massa concrete      | (kg)                |
| $g$            | = gravitasi           | (m/s <sup>2</sup> ) |

### 2.2.6 Regangan *End Cap*

Regangan end cap disebabkan karena adanya tekanan internal di dalam pipa akibat dari aliran fluida. Regangan tersebut terjadi pada bagian akhir pipa yang tersambung dengan belokan (*bend*). Persamaan regangan yang terjadi dalam pipa:

$$\epsilon_E = \frac{\Delta P \cdot D}{4t \cdot E} \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan,

|            |                            |                     |
|------------|----------------------------|---------------------|
| $\Delta P$ | = perbedaan tekanan pipa   | (N/m <sup>2</sup> ) |
| $D_i$      | = diameter internal        | (m)                 |
| $t$        | = <i>wall thickness</i>    | (m)                 |
| $E$        | = modulus elastisitas pipa | (Pa)                |

### 2.2.7 Regangan Poisson

Regangan poisson merupakan hasil dari tekanan melingkar di sepanjang pipa sehingga mengakibatkan pipa meluas. Persamaan regangan poisson adalah:

$$\epsilon_v = - \frac{\nu \cdot \sigma_H}{E} \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan,

$\nu$  = poisson ratio

$\sigma_H$  = hoop stress (N/m<sup>2</sup>)

$E$  = modulus elastisitas pipa (Pa)

### 2.2.8 Regangan Temperatur

Pada saat pipa terinstal, pipa akan melakukan penyesuaian dengan temperatur bawah laut dimana temperatur tersebut jauh lebih dingin dibandingkan dengan temperatur dalam pipa itu sendiri. Peningkatan temperatur dapat terjadi apabila pipa sudah dialiri fluida yang temperaturnya jauh lebih panas dari temperatur lingkungan. Perbedaan ini akan menimbulkan efek regangan yang menjadi dasar ekspansi pada pipa.

$$\epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T \dots\dots\dots(2.5)$$

dengan,

$\alpha$  = koefisien termal

$\Delta T$  = perubahan temperatur =  $T_{\text{desain}} - T_{\text{instalasi}}$  (°C)

Regangan total yang terjadi pada pipa adalah

$$\epsilon_{\text{total}} = \frac{\sigma_H (1-2\nu)}{2 \cdot E} + \alpha \cdot \Delta T \dots\dots\dots(2.6)$$



### 2.2.9 Tahanan Gesek

Pada DNV OS F101 *Submarine Pipeline System*, tahanan gesek pada pipa terjadi akibat adanya faktor tahanan tanah yang bergerak berlawanan dengan pipa pada saat terjadi ekspansi. Untuk pipa bawah laut gesekan akan meningkat secara linear dengan jarak L dari ujung bebas yang sebanding dengan berat pipa kumulatif. Untuk jaringan pipa terkubur, resistansi tambahan untuk gerakan disediakan oleh tekanan tanah yang ada di sekitar pipa.

$$F = \mu \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \rho_b \cdot g \cdot H_b \cdot D_i \cdot (1 + K_o) + (W_s - \rho_b \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4}) \right] \dots \dots \dots (2.7)$$

dengan,

- F = gaya gesekan (N/m)
- $\mu$  = koefisien gesekan
- $\rho_b$  = densitas tanah (kg/m<sup>3</sup>)
- g = gaya gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- H<sub>b</sub> = kedalaman pipa terkubur (m)
- D<sub>i</sub> = diameter pipa (m)
- W<sub>s</sub> = berat terendam pipa (N/m)
- K<sub>o</sub> = koefisien lateral soil stress (K<sub>o</sub> = 1 – sin θ)

Regangan gesekan ditunjukkan dengan

$$\epsilon_f = \frac{F \cdot L}{A_s \cdot E} \dots \dots \dots (2.8)$$

### 2.2.10 Virtual Anchor Point (VAP)

Gesekan antara pipa dan tanah terjadi akibat adanya kekakuan pada tanah dasar laut. Ketika pipa berekspansi ke arah cold end, gesekan pada tanah akan mempengaruhi lajunya. Jika gesekan tanah setara dengan laju pipa, maka gesekan tanah akan menahan laju pipa (Bai, 2005). Pemodelan gesekan antara tanah dan pipa biasanya menggunakan Coloumb. Lokasi titik anchor dapat ditentukan dengan menyamakan gaya yang diterapkan pada gaya gesekan permukaan, diberikan rumus:

$$L_A = \frac{\epsilon_{tot} \cdot A_s \cdot E}{F} \dots\dots\dots(2.9)$$

dengan,

$L_A$  = virtual anchor length (m)

$A_s$  = cross sectional area of steel (m<sup>2</sup>)

$E$  = modulus Young baja (Pa)

$F$  = Frictional resistance (N/m)

$\epsilon_{tot}$  = regangan akibat tekanan internal dan temperatur

$$\epsilon_{tot} = \epsilon_E + \epsilon_V + \epsilon_T \dots\dots\dots(2.10)$$

dengan,

$\epsilon_E$  = regangan akibat end cap

$\epsilon_V$  = regangan akibat poisson

$\epsilon_T$  = regangan akibat temperatur

### 2.2.11 Spektra Gelombang

Pemilihan spektrum energi gelombang didasarkan pada kondisi real dari perairan yang ditinjau. Bila tidak ada, maka dapat digunakan model spektrum yang dikeluarkan oleh berbagai institusi dengan mempertimbangkan kesamaan fisik lingkungan. Harga stokastik karakteristik gelombang dapat dihitung menggunakan persamaan pada Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1. Amplitudo dan Tinggi Gelombang pada Spektrum

| Profil Gelombang                     | Amplitudo        | Tinggi           |
|--------------------------------------|------------------|------------------|
| Gelombang Rata-rata                  | $1,25\sqrt{m_0}$ | $2,5\sqrt{m_0}$  |
| Gelombang Signifikan                 | $2,00\sqrt{m_0}$ | $4,00\sqrt{m_0}$ |
| Rata-rata 1/10 Gelombang Tertinggi   | $2,55\sqrt{m_0}$ | $5,00\sqrt{m_0}$ |
| Rata-rata 1/1000 Gelombang Tertinggi | $3,44\sqrt{m_0}$ | $6,67\sqrt{m_0}$ |

dengan :

$$m_0 = \text{Luasan dibawah kurva spektrum (zero moment)} = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

Persamaan spektrum JONSWAP merupakan modifikasi dari persamaan spektrum Pierson-Morkowitz yang disesuaikan dengan kondisi laut yang ada. Menurut DNV RP C205 (2010) Persamaan spektrum JONSWAP dapat ditulis sebagai berikut :

$$S_J(\omega) = A_{\gamma} S_{PM}(\omega) \gamma^{\exp\left(-0.5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)} \dots\dots\dots(2.11)$$

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \omega_p \omega^{-5} \exp\left(-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \dots\dots\dots(2.12)$$

dengan:

$S_J(\omega)$  = Jonswap Spectrum

$S_{PM}(\omega)$  = Pierson-Moskowitz Spectrum

$A_{\gamma} = 1 - 0.287 \ln(\gamma)$  merupakan faktor normalisasi

$\omega_p = 2\pi/T_p$  = frekuensi angular dari puncak spektra

$T_p$  = Periode puncak spektra

$H_s$  = tinggi gelombang signifikan

$\gamma$  = parameter puncak non-dimensi

$s$  = parameter bentuk

untuk  $\omega \leq \omega_p = 0,07$  dan  $\omega > \omega_p = 0,09$

Harga parameter puncak ( $\gamma$ ) rata-rata berdasarkan eksperiment  $\gamma = 3.3$ . Untuk  $\gamma = 1$  Spektrum Jonswap menjadi sama dengan Spektrum Pierson Moskowitz. Jika tidak diketahui harga  $\gamma$  , dapat digunakan persamaan berikut:

$$\gamma = 5 \text{ untuk } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3.6$$

$$\gamma = \exp ( 5.75 - 1.15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} ) \text{ untuk } 3.6 < \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} < 5$$

$$\gamma = 1 \text{ untuk } 5 \leq \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

Formulasi spektra respon gerakan bangunan apung di gelombang acak menggunakan persamaan berikut:

$$S_{\zeta r}(\omega) = RAO^2 \times S_{\zeta}(\omega) \dots \dots \dots (2.13)$$

dengan,

$S_{\zeta r}(\omega)$  = Spektra Respon gerakan bangunan apung di gelombang acak

$RAO$  = *Response Amplitude Operator*

$S_{\zeta}(\omega)$  = Spektrum Gelombang

### 2.2.12 *Response Amplitude Operator (RAO)*

*Response Amplitude Operator* atau yang biasanya disingkat  $RAO$  merupakan amplitudo dari respon harmonik atau sinusoidal yang disebabkan oleh beban/gaya yang bersifat harmonik juga. Atau definisi lainnya adalah respon gerakan benda akibat eksitasi gelombang satu meter. Dalam hal ini  $RAO$  yang dimaksud adalah  $RAO$  motion yaitu menganalisa enam derajat pergerakan pada kapal (*yawing, swaying, pitching, rolling, surging, heaving*). Biasanya  $RAO$  ini disajikan dalam bentuk grafik dimana absisnya adalah berupa parameter frekuensi, sedangkan ordinatnya adalah merupakan rasio antara amplitudo gerakan pada mode tertentu dengan amplitudo gelombang. Persamaan  $RAO$  secara matematis adalah sebagai berikut:

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \dots \dots \dots (2.14)$$

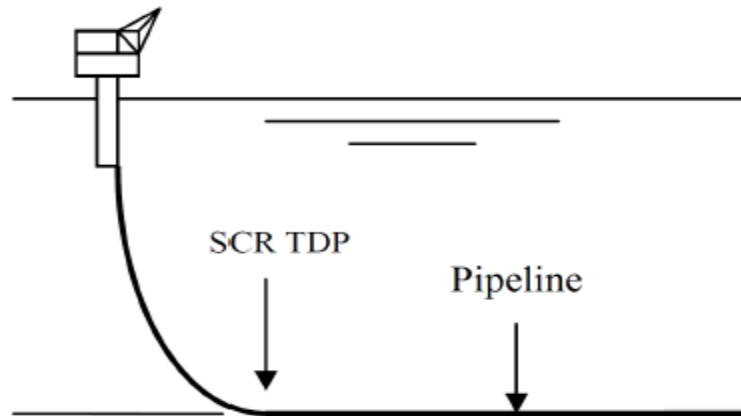
dengan,

$X_p(\omega)$  = amplitudo respon struktur

$\eta(\omega)$  = amplitudo gelombang

### 2.2.13 Pengaruh *Steel Catenary Riser* pada *Pipeline Walking*

Seperti yang sudah dijelaskan sebelumnya bahwa bagian *cold end* pada pipa bawa laut adalah bagian akhir sambungan dengan *facility* atau *riser*. Pada laut dalam, *steel catenary riser* (SCR) biasanya merupakan sambungan antara pipa bawah laut dan *facility*. Desain dari SCR menyebabkan *tension* yang terjadi pada *touch down zone* (Carr *et al.*, 2008).



**Gambar 2.4** SCR dan Pipa Bawah Laut (Yoon, 2013)

*Tension* tersebut dapat menyebabkan pipa mengalami *walking* pada beberapa siklus yang berulang. Pada analisis yang sudah ada, *pipe walking* terjadi akibat profil termal, yaitu gradient dari profil tersebut. Namun *tension* pada *riser* juga merupakan faktor lainnya yang dapat menyebabkan *walking behavior* dan bahkan dapat melebihi mekanisme termal transient (Carr *et al.*, 2003).

*Tension* pada *steel catenary riser* ada dua menurut Jaeyoung Lee yaitu *top tension* dan *bottom tension* dan dapat dituliskan dalam rumus sebagai berikut (Lee, 2008):

$$\text{Top tension, } T = T_H + Ws \cdot Y = T \sin \alpha + Ws \cdot Y = \frac{Ws \cdot Y}{1 - \sin \alpha} \dots \dots \dots (2.15)$$

dimana,

$W_s$  = berat terendam riser (N/m)

$Y$  = kedalaman laut (m)

$\sin a$  = sudut *hang-off*

$$\text{Bottom tension, } T_H = T \sin a \dots \dots \dots (2.16)$$

dimana,

$T$  = *top tension* (N)

$\sin a$  = sudut *hang-off*

#### 2.2.14 Laju *Walking* per Siklus

*Walking* per siklus adalah besarnya perpanjangan yang terjadi pada pipa akibat adanya ekspansi, penyusutan, dan gesekan tanah dalam tiap siklus. Untuk mengetahui besarnya *walking* per siklus, hal pertama yang harus dilakukan adalah menentukan letak virtual anchor. Setelah letak virtual anchor diketahui, maka dilanjutkan dengan besar aksial force dan aksial strain yang terjadi pada pipa. Sehingga didapatkan rumus untuk mencari jarak antara dua virtual anchor tersebut (Yoon, 2013).

$$X_{ab} = \frac{S_R}{f} \dots \dots \dots (2.17)$$

dimana,

$X_{ab}$  = jarak antara dua virtual anchor (m)

$S_R$  = *Tension SCR* (N)

$f$  = aksial friction force (N/m)

Pipa mengalami perubahan gaya aksial pada bagian di sepanjang *virtual anchor point*. Maka dari itu perubahan gaya aksial yang sepanjang  $X_{ab}$  perlu dihitung dengan rumus:

$$\Delta S_f = S_R - L f \dots \dots \dots (2.18)$$

dengan,

|       |                         |       |
|-------|-------------------------|-------|
| $L$   | = panjang pipa          | (m)   |
| $S_R$ | = <i>Tension</i> SCR    | (N)   |
| $f$   | = aksial friction force | (N/m) |

Setelah mendapatkan perubahan gaya aksial di daerah yang dibatasi oleh *virtual anchor* di poin a (*hot end*) dan *virtual anchor* di poin b (*cold end*), maka selanjutnya perlu dicari perubahan gaya aksial di sepanjang pipa dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\Delta P = -(p_{i,2} - p_{i,1}) A_i (1 - 2\nu) - E A_s k(\theta_2 - \theta_1) \dots \dots \dots (2.19)$$

dengan,

|          |   |                     |
|----------|---|---------------------|
| $P_i$    | = tekanan internal  | (Pa)                |
| $A_i$    | = cross sectional area of inside diameter = $\frac{\pi}{4} (D - 2.t)^2$ | (m <sup>2</sup> )   |
| $A_s$    | = cross sectional area of pipe steel = $\pi (D - t).t$                  | (m <sup>2</sup> )   |
| $\nu$    | = poisson ratio   |                     |
| $E$      | = modulus Young   | (N/m <sup>2</sup> ) |
| $k$      | = koefisien ekspansi termal   | (1/°C)              |
| $\theta$ | = operating temperatur  | (1/°C)              |

Pipa akan mengalami perubahan regangan aksial akibat adanya perubahan gaya aksial di sepanjang pipa. Oleh karena itu, perubahan regangan aksial perlu diperhitungkan dengan rumus:

$$\Delta \varepsilon = \frac{(\Delta S_f - \Delta P)}{EA} \dots \dots \dots (2.20)$$

dimana,

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| $\Delta P$   | = perubahan gaya aksial sepanjang pipa | (N) |
| $\Delta S_f$ | = perubahan gaya aksial sepanjang Xab  | (N) |
| $EA$         | = aksial stiffness                     | (N) |

Sehingga didapatkan rumus untuk perhitungan walking per cycle akibat *tension* pada SCR adalah:

$$\Delta_R = \frac{(|\Delta P| + S_R - f L) S_R}{E A f} \dots\dots\dots(2.21)$$

dengan,

EA = aksial stiffness (N)

S<sub>R</sub> = *Tension* SCR (N)

f = aksial friction force (N/m)

L = panjang pipa (m)

|\Delta P| = perubahan gaya aksial sepanjang pipa (N)

|\Delta P| dimana menunjukkan kondisi sebagai berikut:

$$|\Delta P| + S_R > L \cdot f;$$

$$|\Delta P| + S_R \leq L \cdot f$$

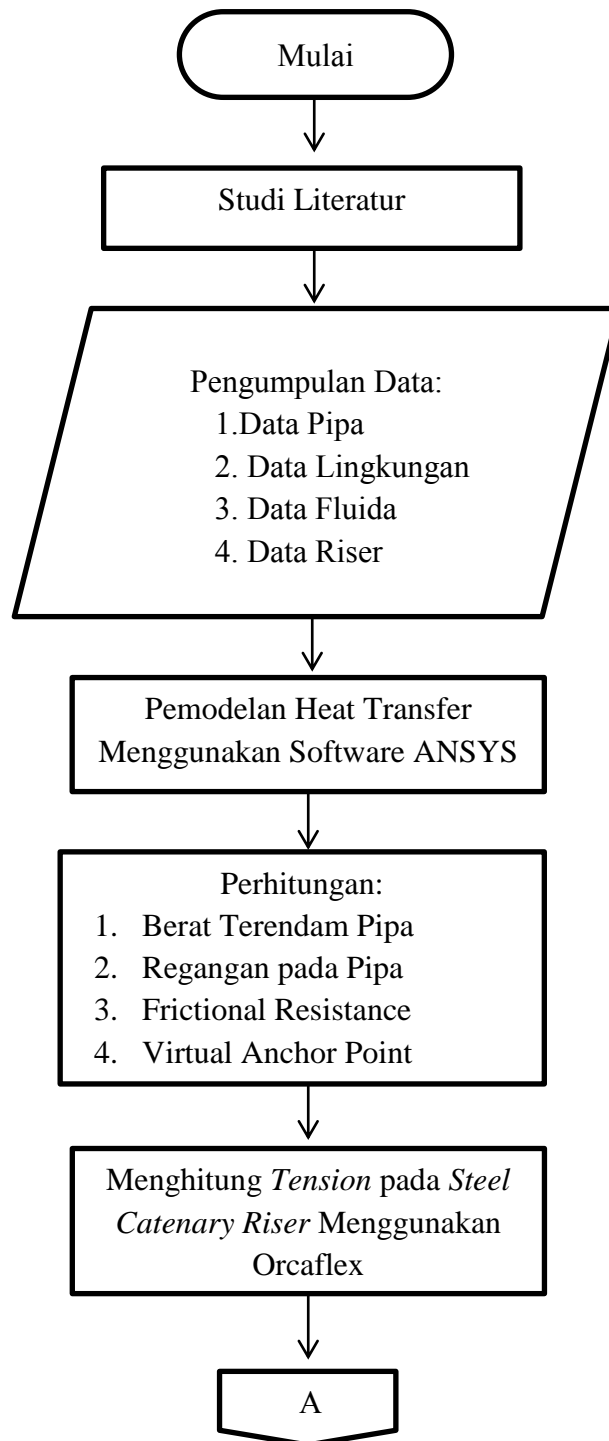


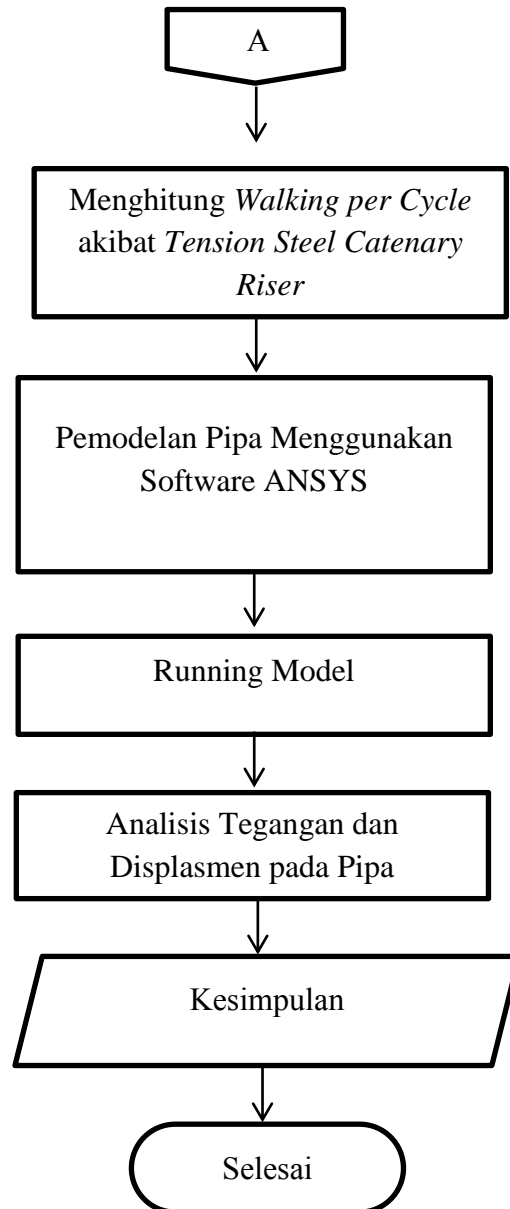
*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Penjelasan mengenai pengerjaan tugas akhir dapat dilihat pada flow chart berikut :





**Gambar 3.1** Diagram Alir Proses Pengerjaan Tugas Akhir

Langkah-langkah penelitian pengerjaan tugas akhir yang tertera pada gambar 3.1 akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Studi literatur

Tahap awal dari pengerjaan tugas akhir ini adalah dengan mengumpulkan dan mempelajari literatur yang berkaitan dengan tugas akhir ini. Literatur yang dikumpulkan dapat berupa jurnal, tugas akhir, thesis, buku, *codes* yang membahas dan mengatur permasalahan *pipeline walking*. Studi literatur bertujuan untuk mendalami permasalahan *pipeline walking*

termasuk faktor-faktor yang mempengaruhi, efek yang ditimbulkan, dan juga mitigasinya.

## 2. Pengumpulan data

Data-data yang diperlukan untuk melakukan pengerjaan tugas akhir ini antara lain:

- a. Data pipa berupa panjang pipa, tekanan desain, temperatur desain, temperatur desain, tekanan desain, dll,
- b. Data material pipa berupa tipe material, modulus young, SMYS, diameter dan tebal pipa, dll,
- c. Data lingkungan berupa kedalaman laut, tipe tanah, suhu air laut, dll,
- d. Data properties fluida berupa jenis fluida, densitas, viskositas, laju aliran, konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik.
- e. Data riser berupa berat terendam riser, sudut *hang off*, *wall thickness*, diameter, dll.

## 3. Pemodelan *heat transfer*

Pemodelan *heat transfer* dilakukan untuk mengetahui perubahan temperatur yang terjadi di sepanjang pipa mulai dari inlet hingga outlet akibat pengaruh fluida di dalam pipa dan lingkungan. Perubahan temperatur di sepanjang pipa diperlukan untuk menghitung regangan yang terjadi pada pipa untuk memperoleh nilai *walking per cycle*.

## 4. Perhitungan berat terendam pipa, regangan total, *frictional resistance*, dan *virtual anchor point*.

- a. Perhitungan berat terendam pipa ini digunakan untuk menentukan letak *virtual anchor*, karena berat terendam pipa akan mempengaruhi besarnya tahanan gesek antara tanah dan pipa.
- b. Perhitungan regangan total meliputi regangan end cap, regangan poisson , dan regangan temperatur yaitu untuk mengetahui total regangan yang terjadi pada pipa.
- c. Perhitungan *frictional resistance* merupakan perhitungan gaya-gaya friksi atau gaya gesekan yang mengenai pipa akibat ekspansi termal pada pipa. Perhitungan ini mengacu pada DNV OS F101.

- d. Perhitungan *virtual anchor point* merupakan perhitungan letak titik dimana pipa tidak mengalami ekspansi.
5. Menghitung *walking per cycle* akibat *tension steel catenary riser*  
Perhitungan *walking per cycle* merupakan perhitungan untuk mengetahui pemanjangan pipa (*walking*) pada setiap siklusnya akibat dari *tension* yang dihasilkan oleh *steel catenary riser* dan ekspansi termal.
6. Pemodelan pipa menggunakan software ANSYS  
Pemodelan pipa dengan menggunakan software ANSYS ini dilakukan untuk menggambarkan dan menganalisis tegangan yang terjadi pada pipa akibat adanya *pipeline walking* yang disebabkan oleh ekspansi termal dan *tension* pada *steel catenary riser*. Dalam pemodelan ini diperlukan input data awal berupa data properti pipa dan gaya-gaya yang bekerja pada pipa. Setelah memasukkan data maka selanjutnya dilakukan running untuk mendapatkan besar tegangan dan displasmen yang terjadi pada pipa.
7. Kesimpulan dan saran  
Setelah melakukan analisis sesuai dengan prosedur di atas, maka akan ditarik kesimpulan dari perhitungan yang telah dilakukan. Dan saran-saran juga akan diberikan untuk penelitian selanjutnya.

### 3.2 Pengumpulan Data

Pengumpulan data merupakan langkah awal yang penting untuk mengerjakan dan menganalisis tugas akhir ini.

#### 3.2.1 Data Pipeline

Data pipeline yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.1** Data Pipeline

| Characteristics                           | Information/Value                     | Dimension         |
|---|---------------------------------------|-------------------|
| Transported Medium                        | Well stream                           |                   |
| Pipe Material                             | Carbon steel with corrosion allowance |                   |
| Pipe Length                               | 3000000                               | mm                |
| Internal Diameter (ID)                    | 317,5                                 | mm                |
| Schedule                                  | 80                                    |                   |
| Wall Thickness                            | 19,05                                 | mm                |
| Mean Radius                               | 158,75                                | mm                |
| Outer Diameter (OD)                       | 473,6                                 | mm                |
| Steel OD                                  | 355,6                                 | mm                |
| Corrosion Allowance                       | 3                                     | mm                |
| Steel Grade                               | DNV SMLS 450 FPDU                     |                   |
| Steel Density                             | 7850                                  | kg/m <sup>3</sup> |
| Young's Modulus                           | 207                                   | GPa               |
| Specified Minimum Yield Stress (SMYS)     | 450                                   | MPa               |
| Specified Minimum Tensile Strength (SMTS) | 535                                   | MPa               |
| Poisson's Ratio                           | 0,3                                   |                   |
| Thermal Coefficient                       | $1,17 \times 10^{-5}$                 | 1/°C              |
| Design Pressure                           | 307                                   | Bar               |
| Design Temperatur                         | 78                                    | °C                |
| Installation Temperatur                   | 57                                    | °C                |

|                   |      |                   |
|-------------------|------|-------------------|
| Pipe Joint Length | 12,1 | m                 |
| Field Joint       | 0,3  | m                 |
| Concrete Density  | 3044 | kg/m <sup>3</sup> |

### 3.2.2 Data Lingkungan

Berikut ini adalah data lingkungan yang digunakan pada penelitian ini, dimana pipa beroperasi.

**Tabel 3.2** Data Lingkungan

| <b>Parameter</b>             | <b>100 years return period</b> | <b>Dimension</b>  |
|------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| <b>Depth</b>                 | 300                            | m                 |
| <b>Wave :</b>                |                                |                   |
| Significant Wave Height (Hs) | 5,3                            | m                 |
| Peak period (Tp)             | 11,1                           | s                 |
| Maximum Wave Height (Hm)     | 10,2                           | m                 |
| Average period (Tm)          | 6,71                           | m                 |
| Wave Spectrum                | JONSWAP                        |                   |
| <b>Current :</b>             |                                |                   |
| Surface                      | 1                              | m/s               |
| Mid depth                    | 0,8                            | m/s               |
| Near bottom                  | 0,8                            | m/s               |
| <b>Sea Water Temperature</b> | 59 <sup>o</sup>                | F                 |
| <b>Frictional Factor</b>     | 1,5                            |                   |
| <b>Soil Density</b>          | 1835,49                        | kg/m <sup>3</sup> |

### 3.2.3 Data Fluida

Data fluida yang digunakan ini untuk mengidentifikasi jenis fluida yang mengalir dalam pipa. Data fluida yang digunakan adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.3** Data Fluida

| Characteristics        | Information/Value       | Dimension             |
|------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Fluid                  | Well Stream (Crude Oil) |                       |
| Fluid Density          | 824,9427442             | kg/m <sup>3</sup>     |
| Viscosity              | 2,9                     | Mpas                  |
| Specific Heat Capacity | 0,475                   | BTU/lbF               |
| Thermal Conductivity   | 0,0789                  | BTU/ft <sup>h</sup> F |
| Mass Flow Rate         | 13607,7711              | kg/h                  |

### 3.2.4 Data Riser

Berikut ini adalah data riser yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

**Tabel 3.4** Data Riser

| Characteristics            | Information/Value      | Dimension         |
|----------------------------|------------------------|-------------------|
| Outer Diameter (OD)        | 406,4                  | mm                |
| Transversal Sectional Area | 0,0194                 | m <sup>2</sup>    |
| Wall Thickness             | 15,81                  | mm                |
| Young's Modulus            | 2,06 x 10 <sup>8</sup> | kN/m <sup>2</sup> |
| Hang Off Angle             | 30,3 <sup>0</sup>      |                   |
| Submerged Weight           | 1190                   | N/m               |



*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB IV

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Umum

Fenomena *pipeline walking* merupakan salah satu penyebab terjadinya kegagalan pada pipa bawah laut, sehingga perlu dilakukan analisis lebih lanjut untuk mereduksi dan mencegah kemungkinan terjadinya peristiwa yang juga sering disebut *snaking* ini. *Pipeline walking* adalah peristiwa lanjutan akibat ekspansi pipa berupa pergerakan aksial dari *hot end* menuju *cold end* yang merupakan akhir dari pipa. Jenis kegagalan yang diakibatkan oleh peristiwa ini antara lain, buckling pada pipa dan tekanan yang berlebihan pada koneksi pipa seperti spool, riser, dll.

Dalam pengoperasian pipa bawah laut ada dua kondisi yang merupakan cikal bakal terjadinya *pipeline walking*, yaitu kondisi *start up* dimana pipa dioperasikan dan memiliki tekanan dan temperatur yang tinggi yang menyebabkan pipa mengalami pemuaian atau ekspansi. Namun demikian tidak selamanya pipa dioperasikan, ada kalanya pipa dilakukan *maintenance* atau perawatan yang biasanya disebut sebagai kondisi *shut down*. Pada kondisi ini pipa yang awalnya mengalami ekspansi akan menyusut karena temperatur dan suhu di dalam pipa menurun, tetapi karena ada pengaruh gesekan tanah sehingga pipa tidak akan kembali ke posisi semula (*initial condition*).

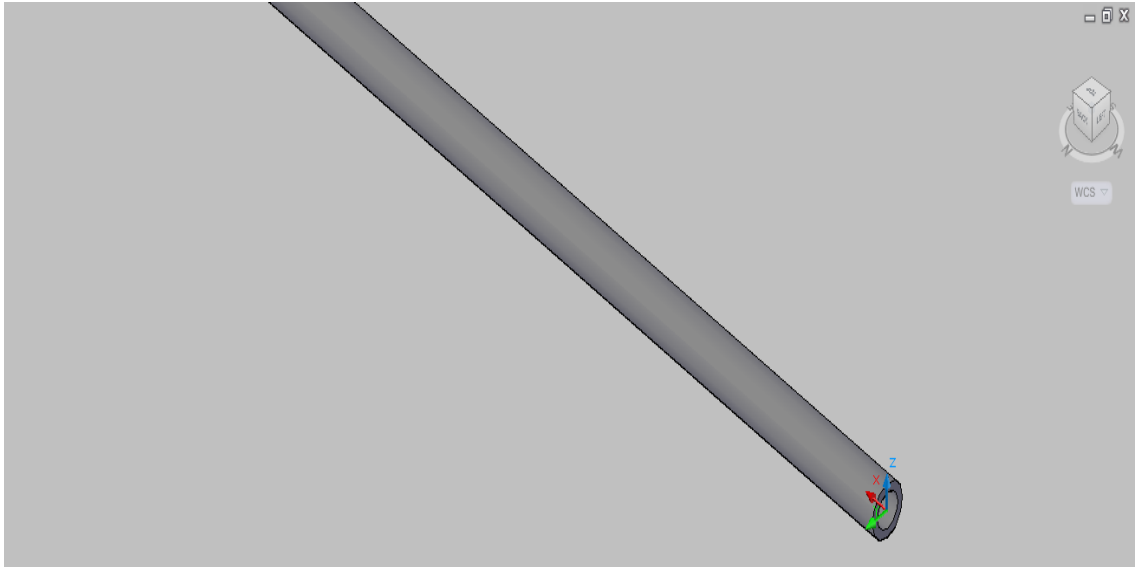
Terdapat 6 siklus (1 siklus = 1x *start up* – 1x *shut down*) dalam satu tahun yang terjadi pada pipa dalam tugas akhir ini. Artinya akan dilakukan perawatan pada pipa tiap dua bulan sekali yang menyebabkan pipa berhenti beroperasi sementara dan kemudian dapat beroperasi kembali setelah perawatan selesai.

Dalam tugas akhir ini objek yang akan dianalisis adalah pipa bawah laut dengan panjang 3000 meter dan dioperasikan pada kedalaman maksimum 300 meter. Pipa ini merupakan pipa *flowline* yang berfungsi sebagai sistem transportasi fluida dari sumur (*well*) menuju platform melalui riser. Dalam penelitian ini, riser berjenis *steel catenary riser*, dimana *tension* yang dihasilkan oleh *steel catenary riser* merupakan salah satu faktor penyebab terjadinya *pipeline walking*. Sehingga faktor-faktor penyebab terjadinya *pipeline walking* pada penelitian ini disebabkan oleh perubahan temperatur disepanjang pipa, jenis tanah, dan *tension* yang dihasilkan oleh *steel catenary riser*.

#### **4.2 Pemodelan Heat Transfer**

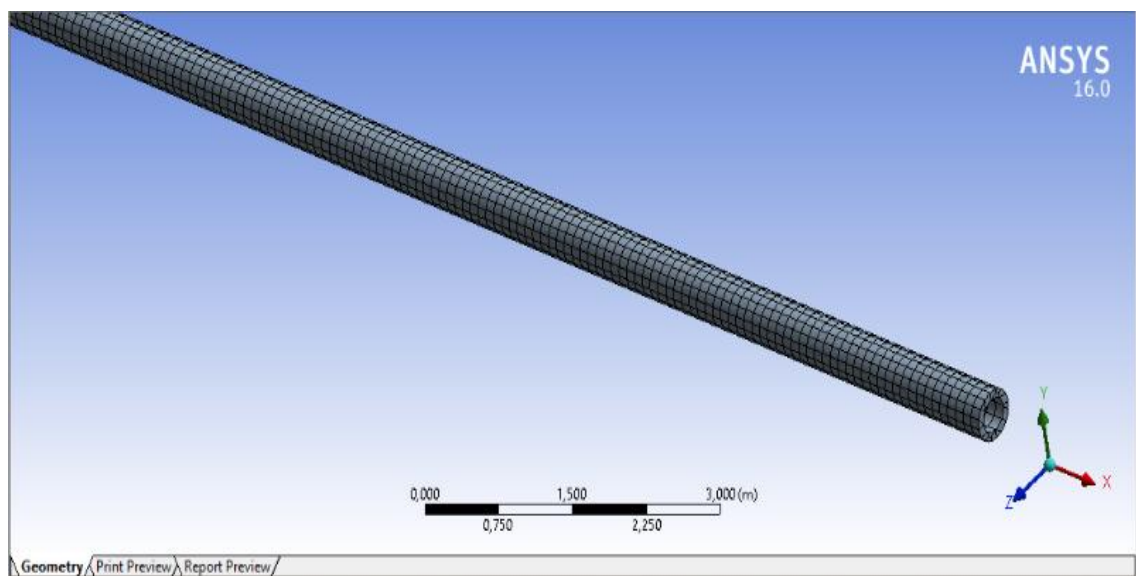
Pemodelan heat transfer ini dilakukan untuk mengetahui perpindahan panas di sepanjang pipa yang nantinya digunakan untuk menghitung walking per cycle. Karena data pipa yang terkait dengan temperatur yang ada hanya temperatur pada inlet pipa (*hot end*), sehingga pemodelan perpindahan panas ini juga berguna untuk mengetahui suhu yang ada pada outlet pipa (*cold end*). Dua software yang memiliki fungsi berbeda digunakan dalam pemodelan perpindahan panas pada penelitian ini, dimana software yang pertama yaitu Autocad digunakan untuk mendesain geometri awal pipa dan software yang ke-dua yaitu ANSYS digunakan untuk melakukan analisis perpindahan panas.

Hal pertama yang dilakukan adalah memodelkan geometri pipa sepanjang 3000 meter, diameter terluar dan diameter dalam secara berurutan sebesar 355. mm dan 317,5 mm, dengan menggunakan software Autocad. Hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.1.



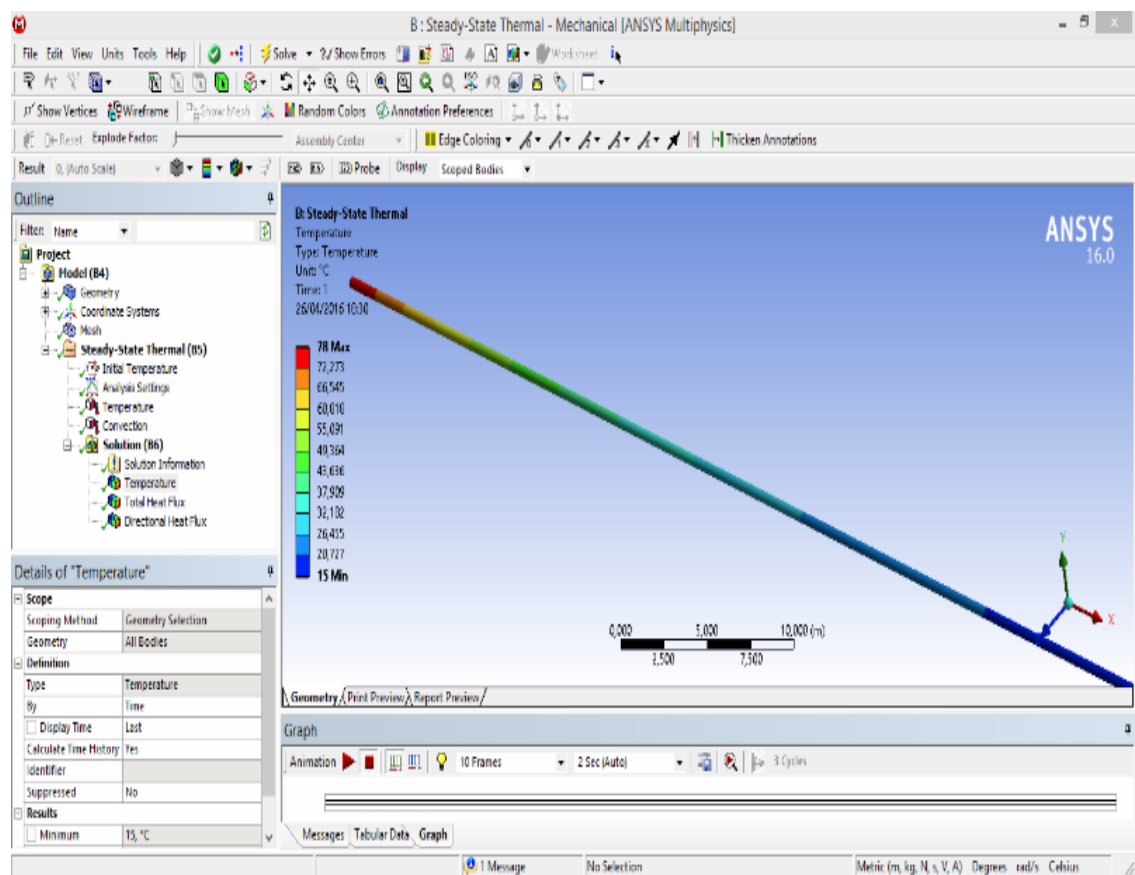
**Gambar 4.1** Pemodelan Pipa Menggunakan Software Autocad 3D

Setelah memodelkan geometri pipa dengan Autocad, maka langkah berikutnya adalah mengekspor geometri pipa tersebut ke dalam software ANSYS. Langkah-langkah yang harus dijalankan pada software ANSYS adalah melakukan meshing pada pipa yaitu membagi pipa menjadi elemen-elemen kecil agar analisis yang dijalankan oleh software lebih spesifik. Untuk lebih jelasnya, hasil dari meshing dapat dilihat pada gambar 4.2.

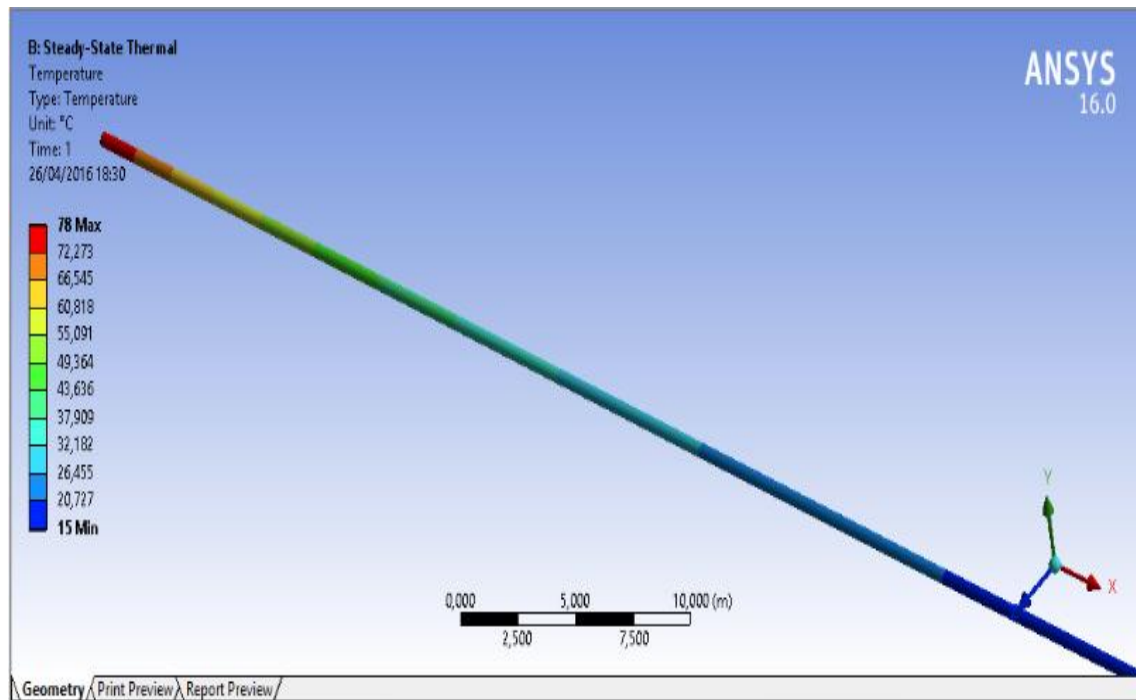


**Gambar 4.2** Meshing Pipa Pada ANSYS 16.0

Setelah melakukan meshing, maka selanjutnya melakukan input data pipa, fluida, dan lingkungan seperti densitas pipa, specific heat capacity, thermal conductivity, temperatur inlet, temperatur lingkungan, dll. Temperatur inlet yaitu ujung pipa yang dekat dengan sumur (*well*) memiliki temperatur sebesar  $78^{\circ}\text{C}$  dan suhu lingkungan dimana pipa dioperasikan memiliki temperatur sebesar  $15^{\circ}\text{C}$ . Setelah memasukkan data-data tersebut, running dijalankan sehingga didapatkan perubahan temperatur di sepanjang pipa.












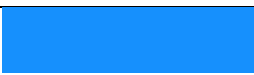

**Gambar 4.3** Hasil Analisis Perpindahan Panas



**Gambar 4.4** Kontur Temperatur Sepanjang Pipa

Perubahan temperatur pipa disajikan dalam bentuk warna, dimana warna merah menunjukkan temperatur tertinggi dengan suhu  $78^{\circ}\text{C}$  dan warna biru menunjukkan temperatur terendah dengan suhu  $15^{\circ}\text{C}$ . Total ada sebelas warna yang menunjukkan temperatur yang berbeda-beda si sepanjang pipa. Untuk melihat hasil perubahan temperatur sepanjang pipa yang lebih jelas, akan disajikan pada tabel 4.1 berikut ini.

**Tabel 4.1** Hasil Perubahan Temperatur Sepanjang Pipa

| Elemen (Warna)  | Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|---|-----------------------------------|
|    | 78 - 72,273                       |
|    | 72,273 - 66,545                   |
|    | 66,545 - 60,818                   |
|    | 60,818 - 55,091                   |
|    | 55,091 - 49,364                   |
|    | 49,364 - 43,636                   |
|   | 43,636 - 37,909                   |
|  | 37,909 - 32,182                   |
|  | 32,182 - 26,455                   |
|  | 26,455 - 20,727                   |
|  | 20,727 - 15                       |

Gambar 4.4 merupakan hasil running perpindahan panas pada software ANSYS yang menunjukkan kontur perubahan temperatur di sepanjang pipa. Dapat dilihat bahwa warna merah menunjukkan temperatur yang paling tinggi yang berada pada inlet pipa yang dekat dengan sumur yang memiliki temperatur sebesar  $78^{\circ}\text{C}$ , sedangkan yang berwarna biru tua menunjukkan temperatur sebesar  $15^{\circ}\text{C}$  yaitu yang terdapat pada outlet pipa yang dekat dengan riser.

Yang menarik bahwa pada pipa panjang, temperatur pada *cold end* memiliki temperatur yang sama dengan suhu lingkungan (*ambient temperature*). Hal tersebut terjadi karena adanya *heat loss* di sepanjang pipa yang menyebabkan suhu di dalam pipa sama dengan suhu lingkungan.

### 4.3 Perhitungan Berat Terendam Pipa

Ketika pipa bawah laut yang meletak pada *seabed* mengalami ekspansi akibat pengoperasiannya, maka pipa akan mendapat gaya tahanan akibat bergesekan dengan tanah. Gaya tahanan tanah akan berlawanan arah dengan arah ekspansi dari pipa, sehingga pipa akan mendapatkan perlawanan dari gesekan tersebut. Untuk itu perhitungan berat terendam pipa diperlukan untuk mengetahui besarnya gaya tahanan tanah yang terjadi antara pipa dengan tanah.

Konsep perhitungan berat terendam pipa pada dasarnya sama seperti penerapan Hukum Archimedes, dimana jika sebuah benda dicelupkan ke dalam zat cair , maka benda tersebut akan mendapat gaya yang disebut gaya apung (gaya ke atas) sebesar berat zat cair yang dipindahkannya. Sehingga perhitungan berat terendam pipa yaitu dengan menjumlahkan berat komponen-komponen pembentuk pipa seperti berat baja, berat *concrete*, berat isi pipa (fluida yang mengalir di dalam pipa), dan berat pelindung pipa lainnya kemudian dikurangi dengan gaya angkat atau bouyancy akibat air laut. Sehingga didapatkan perhitungan berat terendam pipa seperti yang ditampilkan pada tabel 4.2 berikut ini.

**Tabel 4.2** Hasil Perhitungan Berat Pipa Terendam

| Steel Mass      | Content Mass   | Concrete Mass   | Bouyancy Force  | Submerged Weight |
|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| 158,031<br>kg/m | 65,280<br>kg/m | 233,805<br>kg/m | 1768,654<br>N/m | 2711,098<br>N/m  |



Perlu diketahui bahwa setelah menghitung massa pipa di udara, maka untuk menghitung berat terendam pipa, massa pipa di udara (*steel mass*, *content mass*, dan *concrete mass*) harus dikali dengan gravitas sebelum dikurangi dengan bouyancy force. Sehingga didapatkan berat terendam pipa sebesar 2711,098 N/m.

#### 4.4 Perhitungan Regangan

Ada tiga hal utama yang mempengaruhi terjadinya ekspansi pipa adalah temperatur (thermal), tekanan (end cap), poisson contraction (terkait dengan efek tekanan), sehingga perlu dilakukan perhitungan regangan akibat ketiga hal tersebut. Pada fenomena *pipeline walking* ada dua zona yang perlu diperhitungkan terkait dengan perhitungan regangan, yaitu *hot end* dan *cold end*. Dengan memperhitungkan kedua zona tersebut, akan didapatkan letak *virtual anchor*, yaitu titik dimana *expansion force* ekuivalen dengan gaya gesek tanah. Regangan akibat temperatur akibat adanya perbedaan suhu operasi di *hot end* dan *cold end*, sedangkan regangan akibat tekanan (regangan end cap dan poisson) terjadi akibat adanya perbedaan tekanan internal pipa dan eksternal pipa. Untuk mendapatkan regangan total maka dilakukan perhitungan sebagai berikut:

**Tabel 4.3** Hasil Perhitungan Regangan (*Hot end*)

| Zone    | Data                          | Value                   | Unit              | Total Strain |
|---------|-------------------------------|-------------------------|-------------------|--------------|
| Hot End | Ambient Temperature           | 15                      | <sup>0</sup> C    | 0,001084199  |
|         | Operation Temperature         | 78                      | <sup>0</sup> C    |              |
|         | Internal Pressure             | 33125331,67             | N/m <sup>2</sup>  |              |
|         | External Pressure             | 3013500                 | N/m <sup>2</sup>  |              |
|         | Cross Sectional Area of Steel | 0,02013141              | m <sup>2</sup>    |              |
|         | Poisson Ratio                 | 0,3                     |                   |              |
|         | Thermal Coefficient           | 1,17 x 10 <sup>-5</sup> | 1/ <sup>0</sup> C |              |
|         | Modulus Young                 | 207                     | Gpa               |              |

**Tabel 4.4** Hasil Perhitungan Regangan (*Cold End*)

| Zone     | Data                          | Value                 | Unit                 | Total Strain |
|----------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|--------------|
| Cold End | Ambient Temperature           | 15                    | $^{\circ}\text{C}$   | 0,000347     |
|          | Operation Temperature         | 15                    | $^{\circ}\text{C}$   |              |
|          | Internal Pressure             | 33125331,67           | $\text{N/m}^2$       |              |
|          | External Pressure             | 3013500               | $\text{N/m}^2$       |              |
|          | Cross Sectional Area of Steel | 0,02013141            | $\text{m}^2$         |              |
|          | Poisson Ratio                 | 0,3                   |                      |              |
|          | Thermal Coefficient           | $1,17 \times 10^{-5}$ | $1/^{\circ}\text{C}$ |              |
|          | Modulus Young                 | 207                   | Gpa                  |              |

Pada dasarnya regangan terjadi di sepanjang pipa, namun pada penelitian ini hanya difokuskan pada dua zona yang nantinya digunakan untuk mendapatkan *virtual anchor point*. Setelah dilakukan perhitungan didapatkan nilai regangan total pada *hot end* sebesar 0,001084199 sedangkan pada *cold end* sebesar 0,000347. Ada perbedaan nilai yang cukup besar karena pada zona *cold end* tidak terjadi regangan temperatur yang diakibatkan oleh kesamaan suhu lingkungan dengan suhu outlet pipa (seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab pemodelan heat transfer).

#### 4.5 Perhitungan Tahanan Gesek Tanah

Pada fenomena *pipeline walking* tahanan gesek terjadi ketika pipa meregang dan menyusut. Ketika pipa dioperasikan pada suhu dan tekanan yang tinggi pipa akan meregang, tepat pada saat pipa berekspansi timbulah gaya gesek tanah yang menahan laju ekspansi pipa itu sendiri. Sedangkan ketika pipa berhenti dioperasikan sementara untuk keperluan perawatan, pipa yang meregang akan kembali ke posisi semula (menyusut), namun karena adanya tahanan gesek yang terjadi maka pipa tidak akan sepenuhnya kembali pada posisi semula. Oleh karena itu, tahanan gesek tanah akan selalu berlawanan arah dengan arah ekspansi pipa.

Pada penelitian ini, perhitungan tahanan gesek tidak hanya digunakan untuk mengetahui seberapa besar gaya tahanan gesek itu sendiri, namun juga untuk mengetahui letak *virtual anchor*. Faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya tahanan gesek tanah antara lain berat terendam pipa, densitas tanah, koefisien gesek, koefisien lateral soil stress, dll. Berikut ini adalah hasil perhitungan tahanan gesek yang ditampilkan pada tabel 4.5.

**Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Tahanan Gesek**

| <b>Data</b> | <b>Value</b> | <b>Unit</b>       | <b>Frictional Resistance</b> |
|-------------|--------------|-------------------|------------------------------|
| $\mu$       | 1,5          | -                 | 3327,61 N/m                  |
| Pb          | 1835,49      | kg/m <sup>3</sup> |                              |
| G           | 9,81         | m/s <sup>2</sup>  |                              |
| Hb          | 0,1          | m                 |                              |
| D           | 0,4736       | m                 |                              |
| Ws          | 2711,1       | N/m               |                              |

Setelah dilakukan perhitungan, didapatkan nilai tahanan gesek antara pipa dan tanah sebesar 3327,61 N/m. Selanjutnya nilai tahanan gesek ini akan digunakan untuk menentukan letak *virtual anchor point*.

#### **4.6 Perhitungan Letak *Virtual Anchor Point***

*Virtual anchor point* merupakan titik dimana keseimbangan terjadi, artinya besar tahanan gesek dan gaya aksial bernilai sama, sehingga pada titik tersebut pipa tidak akan bergerak atau berkspansi. Pada penelitian ini, karena pipa yang diteliti termasuk pipa panjang maka ada dua titik *virtual anchor* yaitu yang dekat dengan *hot end* dan yang dekat dengan *cold end*.

Letak *virtual anchor* mempengaruhi perubahan regangan aksial sepanjang pipa akibat regangan yang yag berubah-ubah pada kondisi *start up* dan *shut down*. Dalam perhitungan ini faktor-faktor yang mempengaruhi adalah regangan, gaya

tahanan gesek, area pipa, dan modulus elastisitas. Sehingga didapatkan letak virtual anchor point pada kedua ujung pipa sebagai berikut:

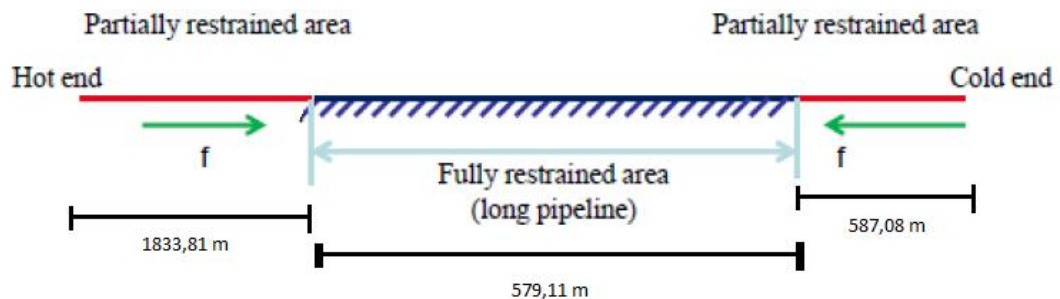
**Tabel 4.6** Perhitungan *Virtual Anchor (Hot End)*

| Data    | Value                   | Unit           | Virtual Anchor Length |
|---------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| Ettotal | 0,0010842               | m <sup>2</sup> | 1833,81 m             |
| As      | 0,0271898               | m <sup>2</sup> |                       |
| E       | 2,07 x 10 <sup>11</sup> | Pa             |                       |
| F       | 3327,605                | N/m            |                       |

**Tabel 4.7** Perhitungan *Virtual Anchor (Cold End)*

| Data    | Value                   | Unit           | Virtual Anchor Length |
|---------|-------------------------|----------------|-----------------------|
| Ettotal | 0,000347                | m <sup>2</sup> | 587,08 m              |
| As      | 0,0271898               | m <sup>2</sup> |                       |
| E       | 2,07 x 10 <sup>11</sup> | Pa             |                       |
| F       | 3327,605                | N/m            |                       |

Dapat dilihat bahwa panjang virtual anchor dihitung pada *hot end* memiliki panjang sebesar 1833,81 m sedangkan pada *cold end* sepanjang 587,08 m. Untuk mempermudah pemahaman berikut ini akan divisualisasikan pada gambar 4.5 sebagai berikut.

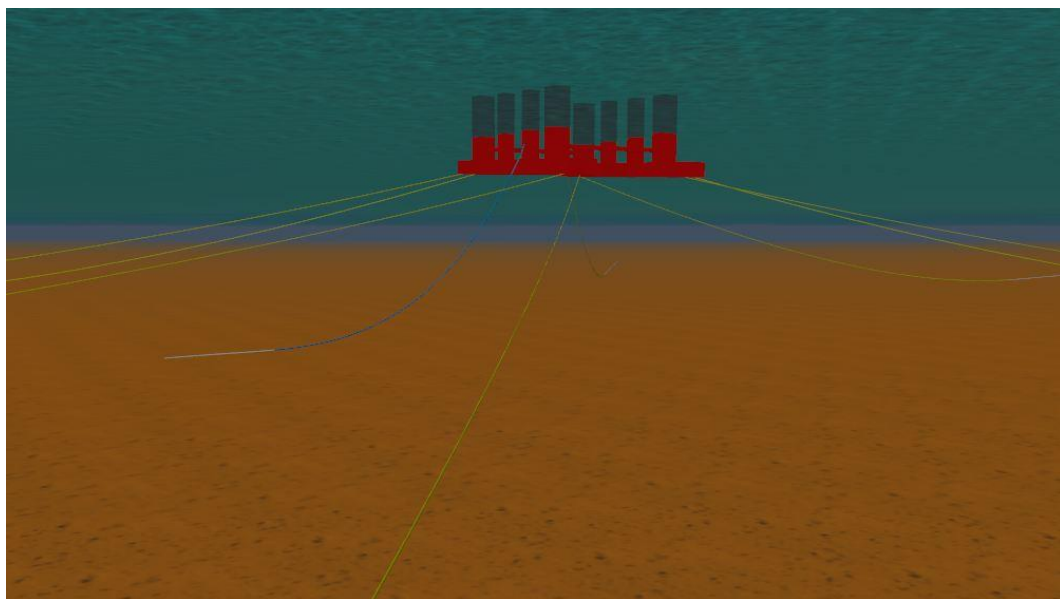


**Gambar 4.5** Letak *Virtual Anchor Point*

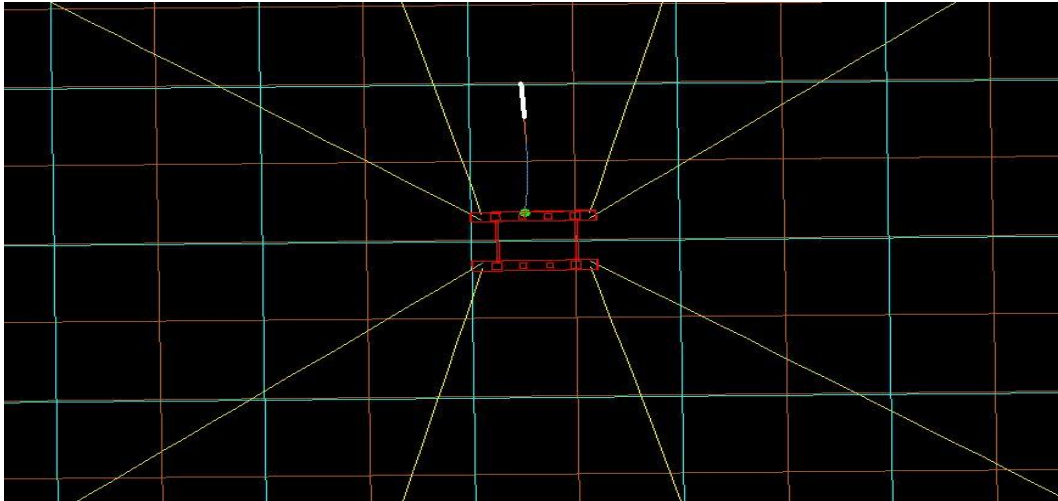
Gambar di atas menunjukkan bahwa pipa berhenti berekspansi pada titik 1833,81 m dari *hot end* dan 587,08 m dari *cold end*, akibat gaya tahanan gesek yang terjadi pada titik tersebut mencapai keseimbangan dengan gaya ekspansi. Sehingga panjang pipa di antara dua *virtual anchor* yaitu sepanjang 579,11 m , antara *hot end* dan *cold end*, akan statis dan tidak mengalami pergerakan (*fully restrained area*). Pipa akan mengalami ekspansi ke arah yang berlawanan yaitu menuju daerah *fully restrained area*, namun akibat adanya gaya gesekan dengan tanah maka arah ekspansi dari *hot end* akan menuju *hot end* dan arah ekspansi dari *cold end* juga akan menuju *cold end*.

#### 4.7 Pemodelan Semi-Submersible

Sebelum melakukan analisis karakteristik gerak struktur, terlebih dahulu dilakukan pemodelan. Pada tugas akhir ini, pemodelan struktur merujuk pada tugas akhir yang dilakukan oleh Erestion (2016).



**Gambar 4.6** Pemodelan Semi-Submersible dengan Sistem *Mooring* dan *Steel Catenary Riser*

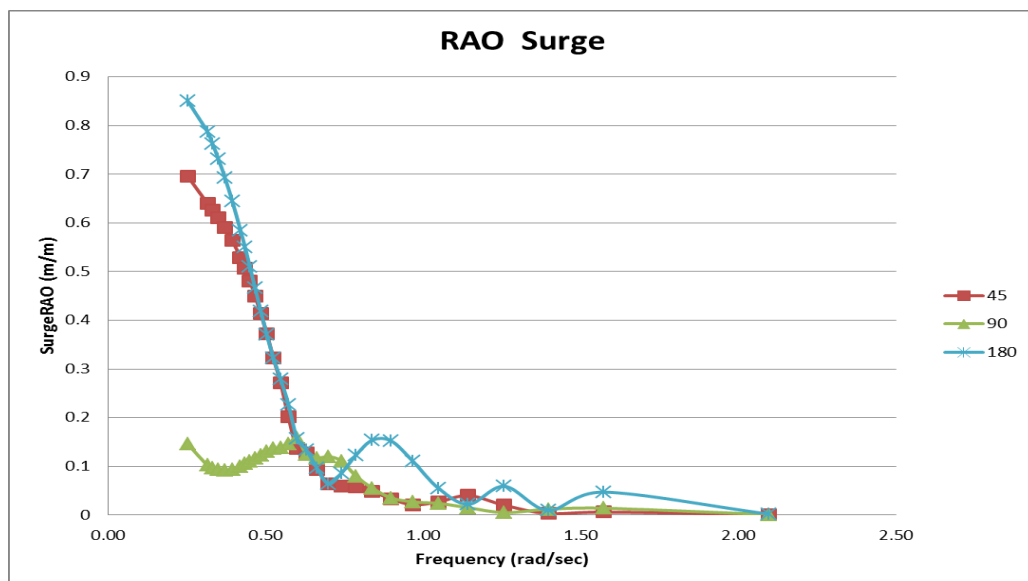


**Gambar 4.7** Pemodelan Semi-Submersible dengan Sistem *Mooring* dan *Steel Catenary Riser* (Tampak Atas)

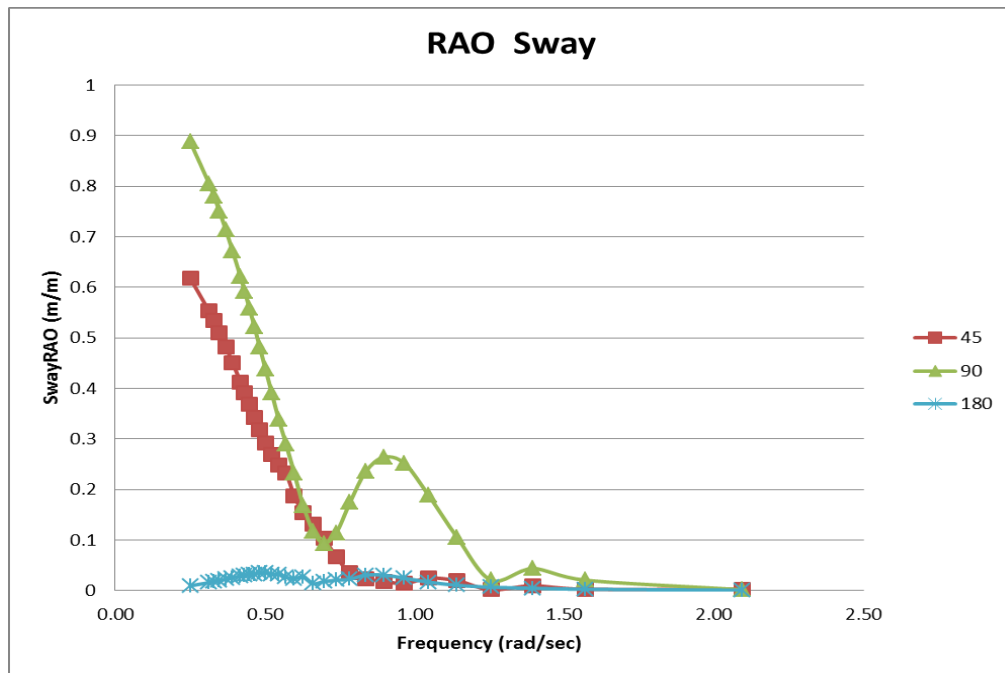
#### 4.8 Karakteristik Gerak Semi-Submersible Pada Gelombang Reguler

Analisis respon gerak ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik struktur pada gelombang reguler. Analisis respon gerak ini berdasarkan arah pembebanan  $45^0$ ,  $90^0$ ,  $180^0$ , dalam enam gerakan (*motion*) *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Hasil *Response Amplitude Operator* (RAO) akan ditampilkan pada grafik di bawah ini.

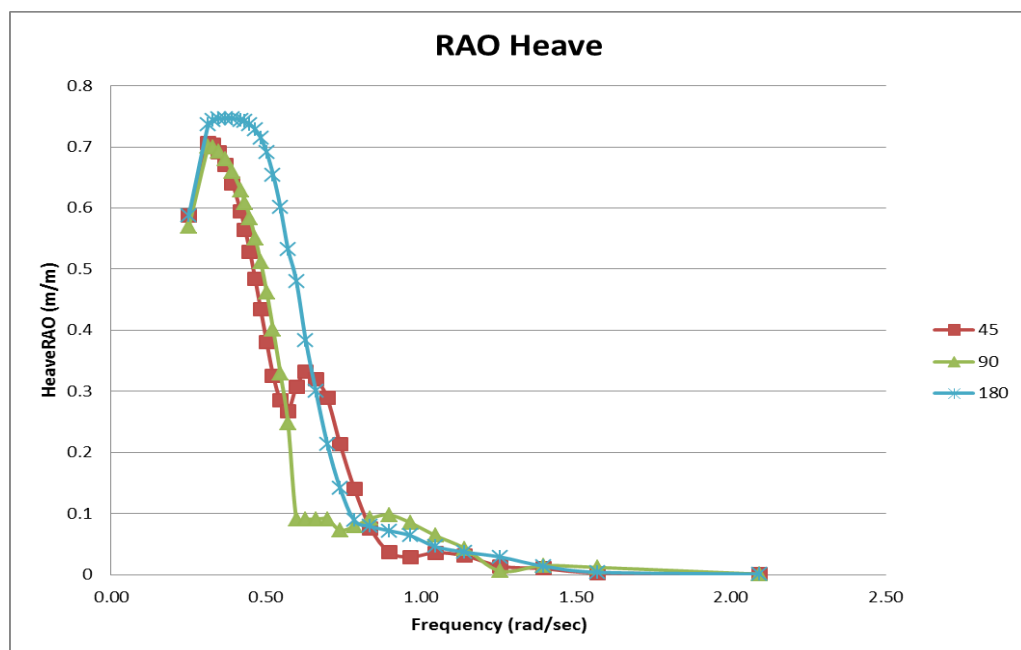
##### 4.8.1 Gerakan Translasional



**Gambar 4.8** RAO *Surge*



**Gambar 4.9 RAO Sway**



**Gambar 4.10 RAO Heave**

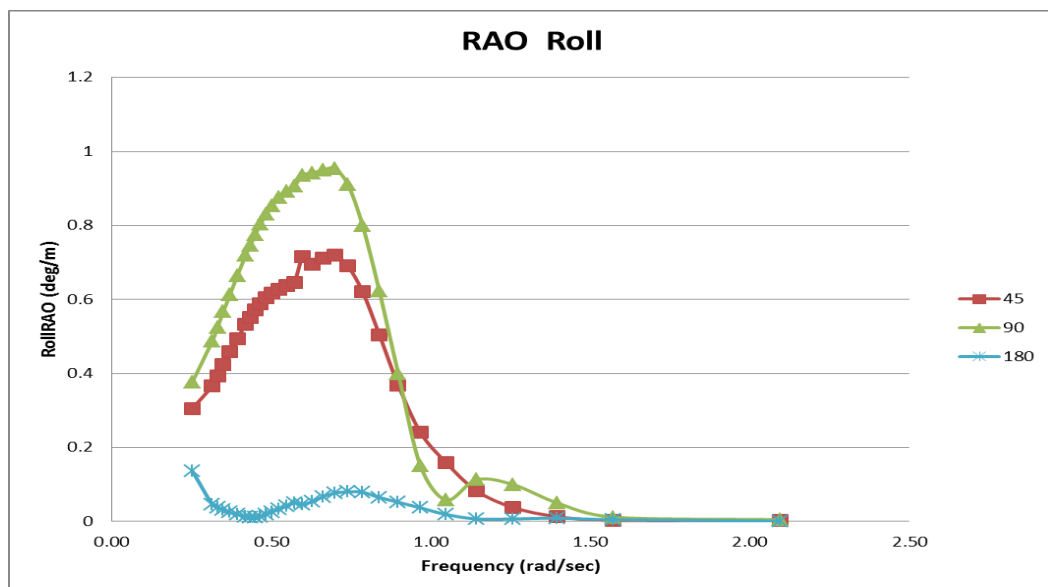
Pada gambar 4.8 di atas terlihat bahwa gerakan *surge* terbesar terjadi pada arah pembebanan  $180^0$  dan pada frekuensi 0,25 rad/s dengan nilai 0,851 m/m. Selanjutnya mengalami penurunan hingga frekuensi 0,70 rad/s, pada frekuensi 0,74 rad/s gerakan kembali meningkat. Untuk pembebanan  $90^0$  gerakan *surge*

bernilai sangat kecil dengan nilai maksimum 0,158 m/m pada frekuensi 0,60 rad/s. Pada arah pembebanan  $45^0$  nilai terbesar terjadi pada frekuensi 0,25 rad/s dengan nilai 0,696 m/m.

RAO gerakan *sway* ditunjukkan pada gambar 4.9 di atas, dimana pola gerakan hampir menyerupai gerakan *surge*. Pada arah pembebanan  $90^0$  pada frekuensi 0,74 rad/s terjadi peningkatan gerakan akibat resonansi dan mencapai puncak resonansi pada frekuensi 0,90 rad/s dengan nilai 0,264 m/m. RAO gerakan *sway* memiliki nilai kecil pada arah pembebanan  $180^0$  dengan nilai maksimum 0,035 m/m pada frekuensi 0,5 rad/s. Sedangkan arah pembebanan  $45^0$  memiliki nilai tertinggi pada frekuensi 0,25 rad/s dengan nilai 0,618 m/m.

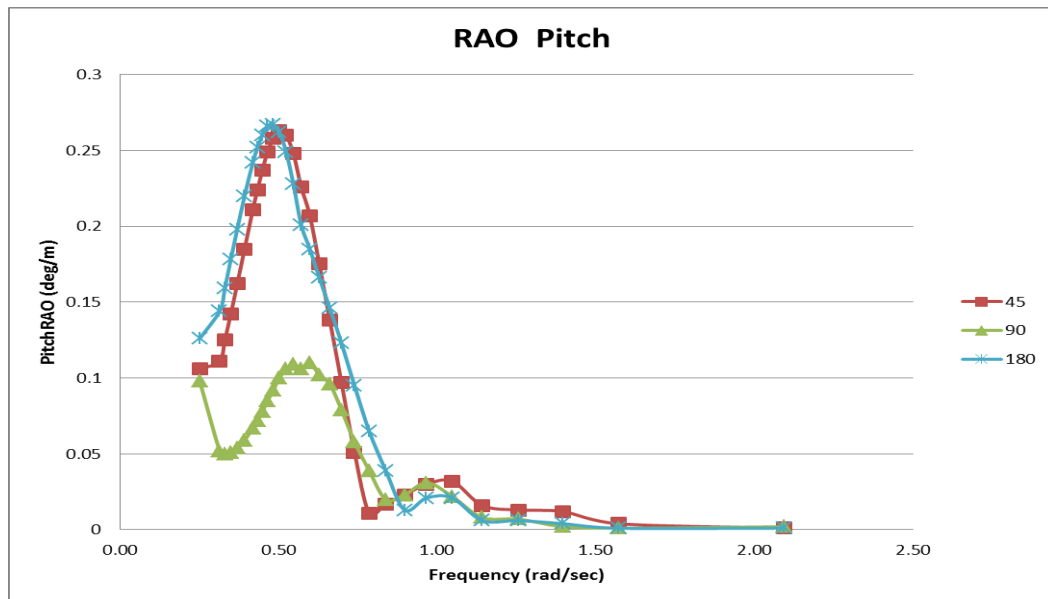
Pada gerakan *heave* yang ditunjukkan pada gambar 4.10 dapat dilihat bahwa nilai terbesar berada pada arah pembebanan  $180^0$  dengan nilai 0,747 m/m pada frekuensi 0,37 rad/s. Sedangkan pada arah pembebanan  $45^0$  dan  $90^0$  nilai tertinggi berada pada frekuensi 0,31 rad/s dengan nilai masing-masing sebesar 0,707 m/m dan 0,701 m/m.

#### 4.8.2 Gerakan Rotasional

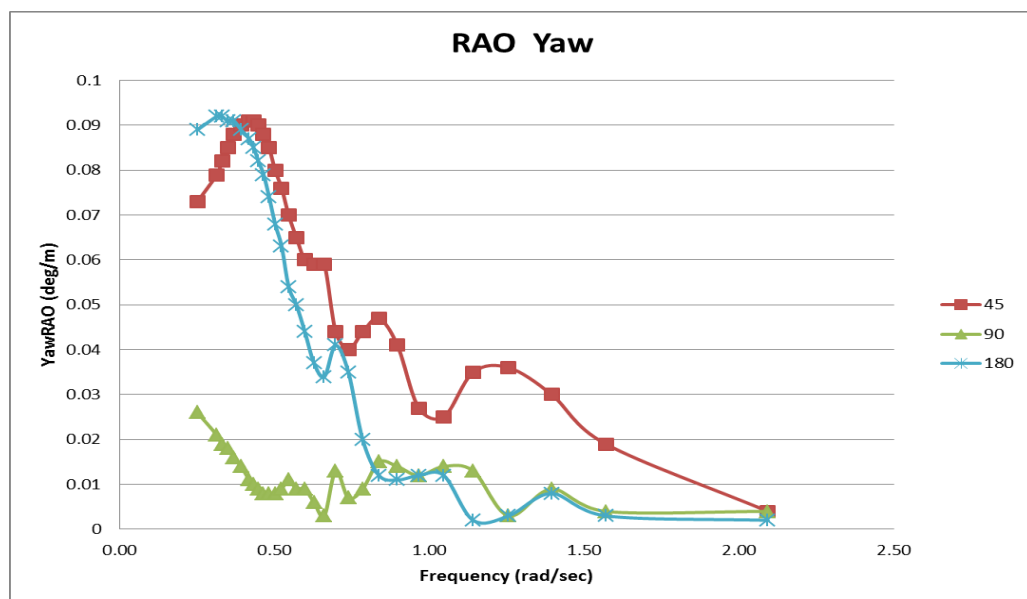


Gambar 4.11 RAO Roll





Gambar 4.12 RAO Pitch



Gambar 4.13 RAO Yaw

Pada gambar 4.11 dapat dilihat bahwa nilai amplitudo terbesar pada gerakan *roll* berada pada arah pembebanan  $90^0$  dengan nilai terbesar yang berada pada frekuensi 0,7 rad/s dengan nilai sebesar 0,953 deg/m. Sedangkan untuk arah  $180^0$  memiliki nilai yang relatif kecil dengan nilai maksimumnya sebesar 0,137 deg/m pada frekuensi 0,25 rad/s. Untuk arah  $45^0$  nilai amplitudo maksimum terjadi pada frekuensi 0,70 rad/s dengan nilai 0,719 deg/m.

Berdasarkan gambar 4.12 pada gerakan *pitch* arah pembebanan  $45^0$  dan  $180^0$  memiliki nilai amplitudo puncak yang hampir sama yaitu masing-masing sebesar 0,263 deg/m pada frekuensi 0,50 rad/s dan 0,267 deg/m pada frekuensi 0,48 rad/s. Sedangkan pada arah gelombang  $90^0$  nilai amplitudo relatif lebih kecil dibandingkan dengan yang lainnya.

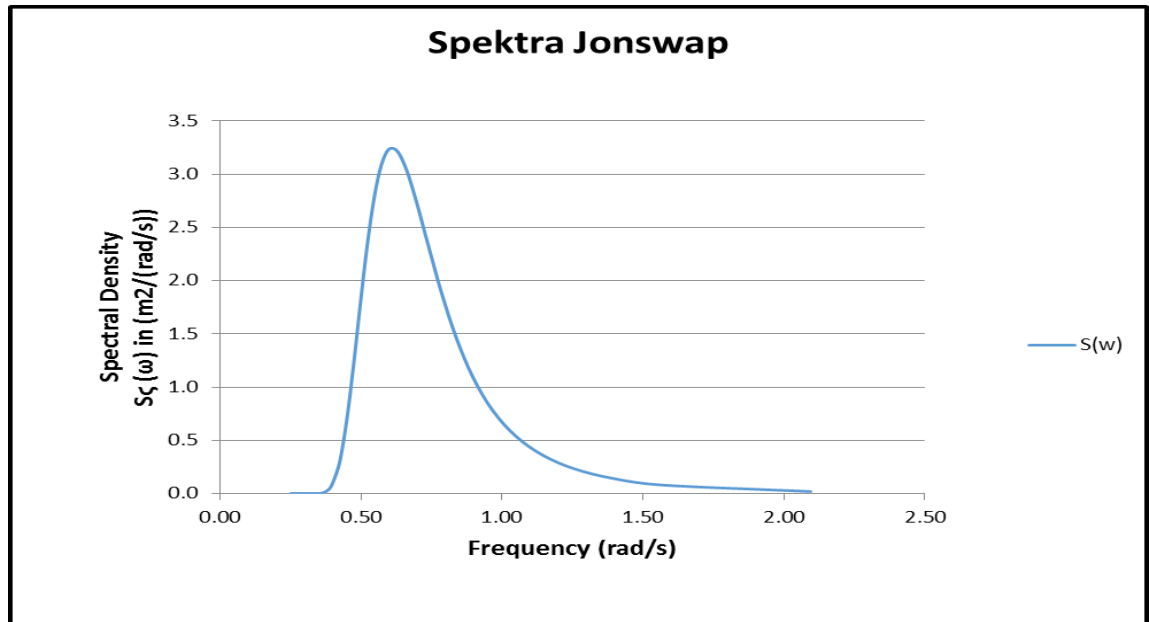
Pada gambar 4.13 untuk gerakan *yaw* dapat dilihat bahwa nilai amplitudo terbesar terjadi pada arah gelombang  $180^0$  dengan nilai sebesar 0,092 deg/m pada frekuensi 0,33 rad/s. Nilai tersebut tidak jauh beda dengan arah pembebanan  $45^0$  pada frekuensi 0,39 rad/s dengan nilai sebesar 0,091 deg/m.

Tabel di bawah ini akan menyajikan nilai RAO maksimum yang terjadi pada struktur ini, sesuai dengan arah pembebanan  $45^0$ ,  $90^0$ , dan  $180^0$  untuk gerakan translasi maupun rotasi.

**Tabel 4.8** Nilai RAO Maksimum

| Gerakan      | Unit  | RAO Maksimum |        |         |
|--------------|-------|--------------|--------|---------|
|              |       | $45^0$       | $90^0$ | $180^0$ |
| <i>Surge</i> | m/m   | 0,696        | 0,158  | 0,851   |
| <i>Sway</i>  | m/m   | 0,618        | 0,888  | 0,035   |
| <i>Heave</i> | m/m   | 0,707        | 0,701  | 0,747   |
| <i>Roll</i>  | deg/m | 0,719        | 0,953  | 0,137   |
| <i>Pitch</i> | deg/m | 0,263        | 0,11   | 0,267   |
| <i>Yaw</i>   | deg/m | 0,091        | 0,026  | 0,092   |

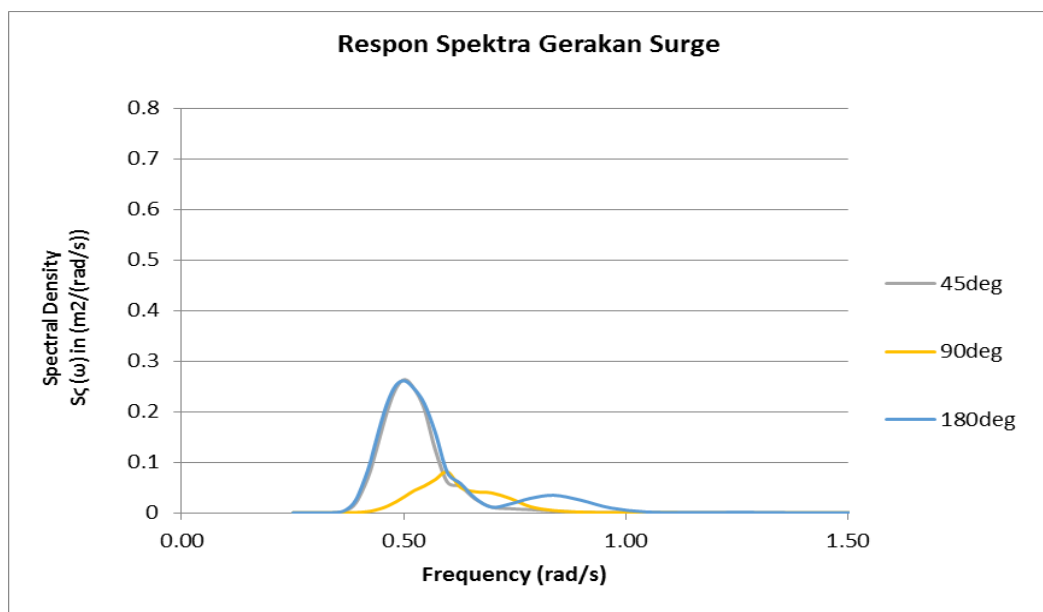
#### 4.9 Respon Gerak Semi-Submersible Pada Gelombang Acak



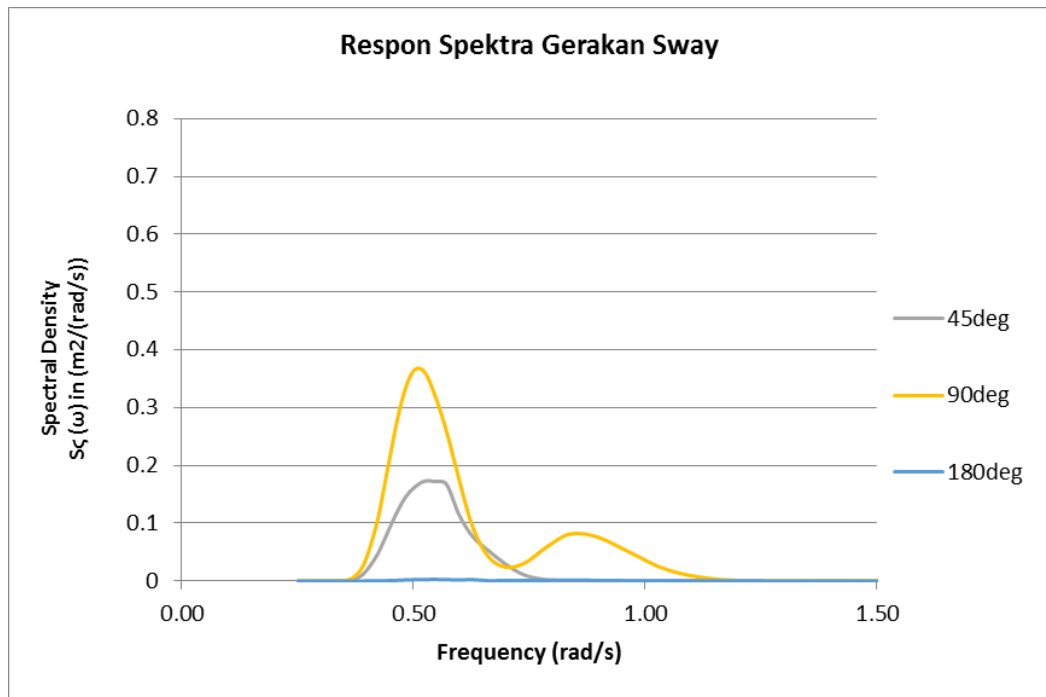
Gambar 4.14 Grafik Spektra JONSWAP

Analisis respon semi-submersible pada gelombang acak dilakukan dengan menggunakan spektra. Gambar 4.14 merupakan grafik spektra JONSWAP pada  $H_s = 5,3$  m dan  $T_p = 11,1$  s.

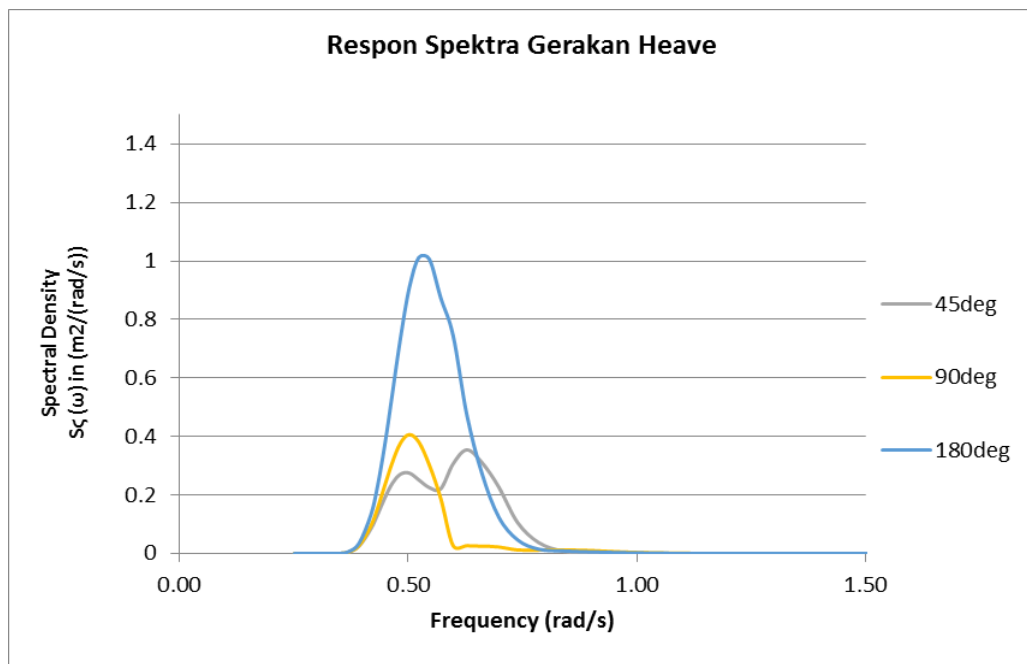
##### 4.9.1 Gerakan Translasional



Gambar. 4.15 Respon Spektra Surge



**Gambar. 4.16** Respon Spektra *Sway*



**Gambar. 4.17** Respon Spektra *Heave*

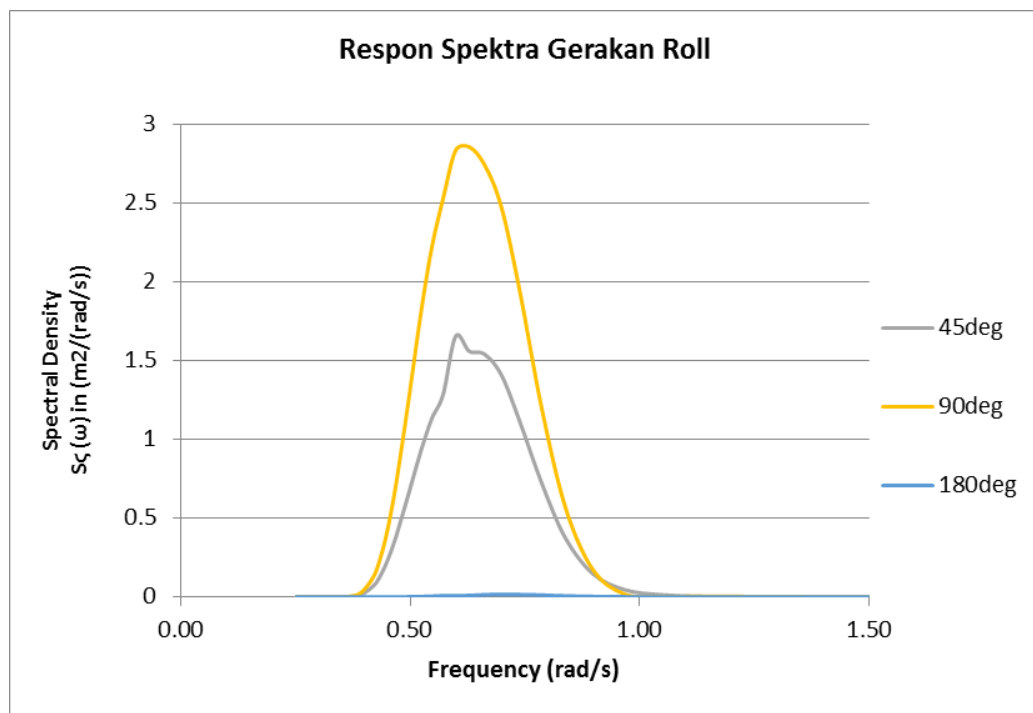
Pada gambar 4.15 dapat dilihat bahwa pada arah pembebanan  $180^0$  dan  $45^0$  respon spektra memiliki kecenderungan yang sama untuk gerakan *surge* dan nilai tersebut relatif lebih kecil dibandingkan dengan puncak spektra gelombang. Nilai respon terbesar berada pada arah pembebanan  $180^0$  dengan nilai  $0,26 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$

pada frekuensi 0,5 rad/s. Sedangkan untuk arah pembebanan  $90^0$  respon spektra relatif lebih kecil dibandingkan dengan arah pembebanan lainnya.

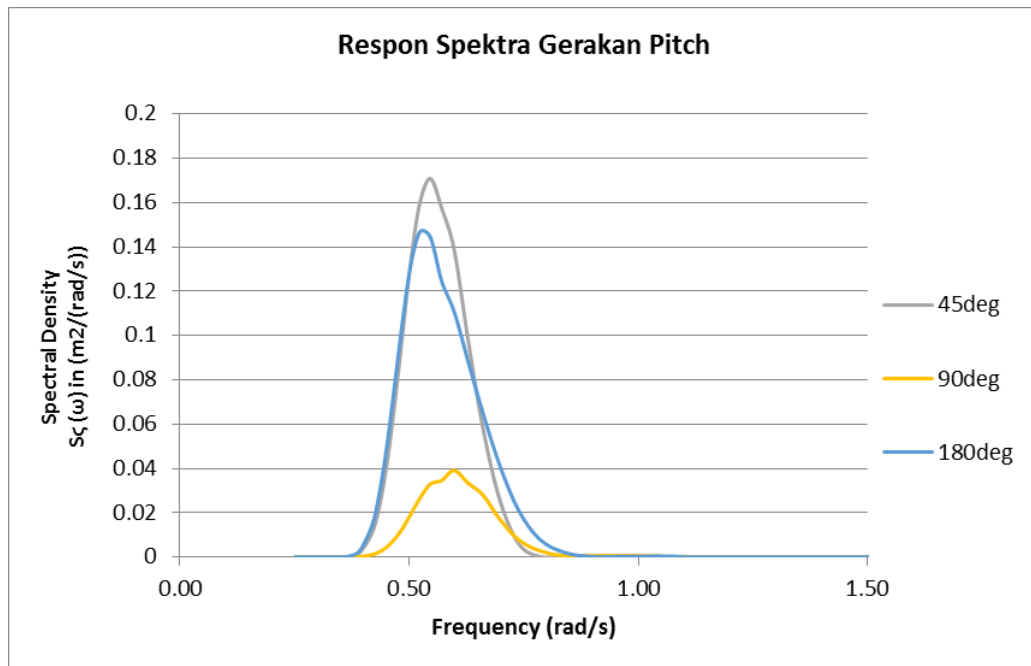
Dapat dilihat pada gambar 4.16 untuk gerakan *sway* respon spektra terbesar terjadi pada arah pembebanan  $90^0$  dengan nilai puncak  $0,36 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$  pada frekuensi 0,5 rad/s, dan nilai tersebut masih di bawah nilai puncak spektra gelombang. Pada arah pembebanan  $180^0$  nilai respon memiliki nilai yang sangat kecil.

Pada gambar 4.17 yaitu respon spektra gerakan *heave* nilai tertinggi berada pada arah pembebanan  $180^0$  dengan nilai puncak sebesar  $1,01 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$  pada frekuensi 0,52 rad/s. Untuk arah pembebanan  $45^0$  dan  $90^0$  nilai respon relatif lebih kecil bila dibandingkan dengan arah pembebanan  $180^0$  yaitu dengan nilai puncak sebesar  $0,41 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$  pada frekuensi 0,5 rad/s untuk arah pembebanan  $90^0$ .

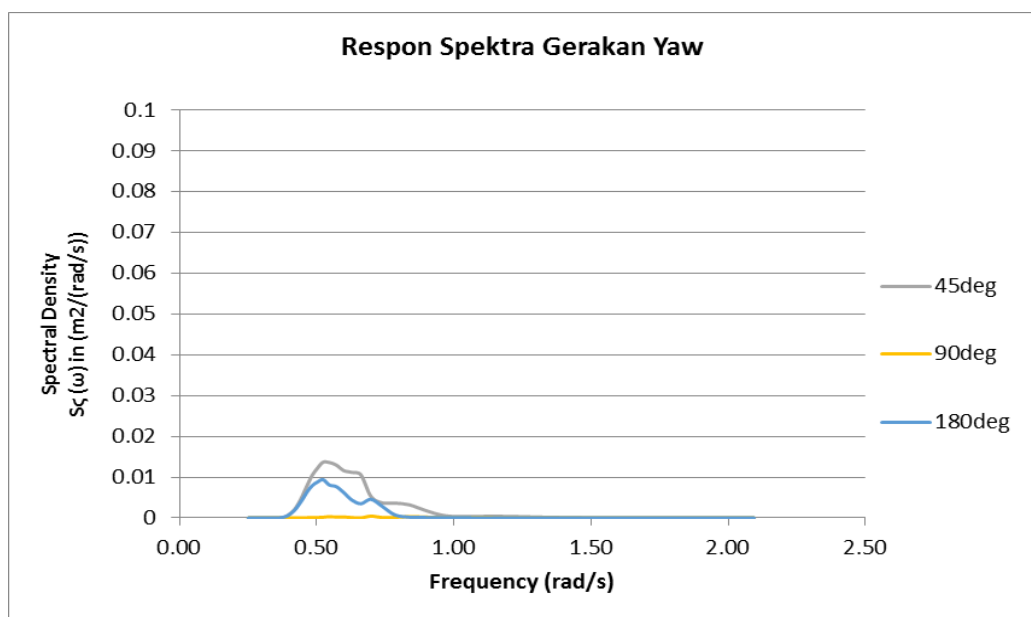
#### 4.9.2 Gerakan Rotasional



**Gambar. 4.18** Respon Spektra *Roll*



**Gambar. 4.19** Respon Spektra *Pitch*



**Gambar. 4.20** Respon Spektra *Yaw*

Gambar 4.18 menunjukkan grafik respon spektra untuk gerakan *roll*, nilai puncak berada pada arah pembebanan  $90^0$  dengan nilai respon sebesar  $2,85 \text{ m}^2/(rad/s)$  pada frekuensi  $0,63 \text{ rad/s}$ . Sedangkan pada arah pembebanan  $45^0$  respon spektra maksimum bernilai  $1,65 \text{ m}^2/(rad/s)$  pada frekuensi  $0,60 \text{ rad/s}$ . Nilai respon sangat kecil terjadi pada arah pembebanan  $180^0$ .

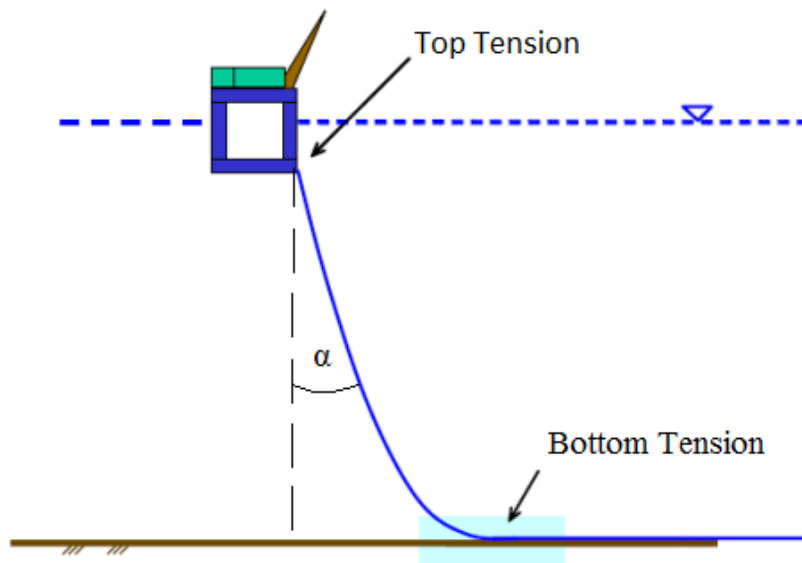
Gambar 4.19 menggambarkan grafik respon spektra untuk gerakan *pitch* dengan nilai puncak yang terjadi pada arah pembebanan  $45^0$  dengan nilai puncak sebesar  $0,17 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$  pada frekuensi  $0,55 \text{ rad/s}$ . Nilai yang hampir sama terjadi pada arah pembebanan  $180^0$  dengan nilai puncak sebesar  $0,14 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$  pada frekuensi  $0,52 \text{ rad/s}$ . Pada arah gelombang  $90^0$  nilai relatif lebih kecil dibandingkan dengan dua arah gelombang lainnya.

Pada gambar 4.20 merupakan grafik respon spektra untuk gerakan *yaw* dengan nilai puncak yang terjadi pada arah pembebanan  $45^0$  dengan nilai puncak sebesar  $0,014 \text{ m}^2/(\text{rad/s})$  pada frekuensi  $0,52 \text{ rad/s}$ . Sedangkan pada arah pembebanan  $90^0$  nilai respon spektra bernilai sangat kecil.

#### **4.10 Tension Steel Catenary Riser**

*Tension* yang ditimbulkan oleh *steel catenary riser* juga merupakan salah satu faktor terjadinya *pipeline walking*. Pada penelitian ini, objek berikutnya yang diteliti selain pipa yaitu *riser* yang berjenis *steel catenary*. *Tension* pada *riser* merupakan akumulasi dari respon gerak dari *floater*. Perhitungan *tension steel catenary riser* dipengaruhi oleh beban dinamis antara lain gelombang dan arus dilakukan menggunakan *software* Orcaflex.

Ada dua *tension* yang terjadi pada *steel catenary riser* yang harus diperhitungkan untuk mendapatkan besarnya *walking per cycle* akibat *tension* yang terjadi pada *steel catenary riser*, yaitu *top tension* dan *bottom tension*. *Top tension* terletak pada *riser* yang bersinggungan langsung dengan *floater*, sedangkan *bottom tension* terletak pada *riser* yang meletak pada permukaan tanah atau *touch down point*. Untuk lebih jelasnya, gambar di bawah ini mengilustrasikan *tension-tension* yang terjadi.



**Gambar 4.21** Ilustrasi *Tension* Pada SCR

Sehingga didapatkan perhitungan *tension* yang terjadi pada *steel catenary riser* yang ditampilkan pada tabel 4.9 sebagai berikut.

**Tabel 4.9** Hasil Simulasi Dinamis *Tension* SCR

| Parameter           | 45 <sup>0</sup> | 90 <sup>0</sup> | 180 <sup>0</sup> |
|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Top Tension (kN)    | 600,957         | 681,260         | 634,967          |
| Bottom Tension (kN) | 251,717         | 323,400         | 303,209          |

*Tension* yang terjadi pada *riser* yang bersinggungan langsung dengan floater memiliki nilai yang lebih besar jika dibandingkan dengan yang berada pada *touch down point* untuk semua arah pembebanan. Namun nilai yang paling besar terletak pada arah pembebanan 90<sup>0</sup> dengan nilai *top tension* sebesar 681,260 kN dan *bottom tension* sebesar 323,400 kN.

#### 4.11 *Walking per Cycle*

Konsekuensi dari terjadinya *pipeline walking* adalah besarnya *walking* tiap siklusnya. *Walking per cycle* merupakan besarnya perpanjangan yang terjadi pada pipa akibat adanya ekspansi, penyusutan, tahanan tanah, *tension* yang dihasilkan oleh *steel catenary riser*, dll tiap siklusnya. Seperti yang sudah diketahui bahwa



dalam pengoperasian pipa bawah laut, ada waktu dimana harus dilakukan perawatan yang menyebabkan pipa berhenti beroperasi atau yang dikenal dengan istilah *shut down*. Pada penelitian ini, diasumsikan perawatan dilakukan setiap dua bulan sekali artinya dalam satu tahun terdapat enam kali perawatan. Pada kondisi ini, temperatur dan tekanan dalam pipa akan menurun tajam yang menyebabkan pipa dapat menyusut. Namun adanya gaya tahanan tanah menyebabkan pipa tidak dapat kembali sepenuhnya pada posisi semula (*initial position*). Hal tersebut terjadi dalam beberapa siklus yang panjang dan merupakan awal terjadinya *pipeline walking*.

Oleh karena itu, perhitungan *walking per cycle* dilakukan untuk mengetahui besarnya perpanjangan tiap siklusnya. Dalam melakukan perhitungan ini, terlebih dahulu dilakukan perhitungan terhadap besarnya perubahan gaya aksial sepanjang pipa. Selain itu perhitungan *virtual anchor point* pada sub bab sebelumnya juga digunakan dalam perhitungan ini, yang akan digunakan untuk menghitung perubahan regangan aksial di sepanjang *virtual anchor*. Dan juga karena pada penelitian ini *pipeline walking* dipengaruhi oleh *tension* yang dihasilkan *steel catenary riser*, sehingga besarnya juga akan digunakan dalam perhitungan ini. Sehingga didapatkan perhitungan *walking per cycle* yang akan ditampilkan pada tabel 4.10 di bawah ini.

**Tabel 4.10** Perhitungan *Walking per Cycle*

| <b><math>\Delta P</math></b><br><b>(N)</b> | <b>SR</b><br><b>(N)</b> | <b>f.L</b><br><b>(N/m)</b> | <b>E</b><br><b>(Pa)</b> | <b>As</b><br><b>(m<sup>2</sup>)</b> | <b>Walking/Cycle</b><br><b>(m)</b> |
|--|-------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 6121338                                    | 323400                  | 1927051                    | $2,07 \times 10^{11}$   | 0,02719                             | 0,078                              |

Dapat dilihat bahwa *walking tiap* siklusnya yang terjadi adalah sebesar 0,078 m. Nilai yang cukup besar mengingat, dampak yang ditimbulkan dari fenomena ini dapat menyebabkan terjadinya kegagalan pada pipa itu sendiri.

#### 4.12 Analisis Tegangan dan Displasmen

Setelah melalui proses kalkulasi di atas, maka langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan tegangan dan displasmen yang terjadi pada pipa akibat *tension* yang dihasilkan oleh *steel catenary riser* dan ekspansi termal. Pekerjaan yang dilakukan meliputi komparasi tegangan dan displasmen sebelum ada *tension* dan setelah ada *tension*. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh *tension steel catenary riser* pada fenomena *pipeline walking*. Pada analisis tegangan dan displasmen ini, software yang digunakan adalah ANSYS Mechanical. Pipa yang dimodelkan hanya sepanjang 12,1 meter di bagian akhir pipa (*hot end*), karena analisis difokuskan pada pipa yang berinteraksi langsung dengan *steel catenary riser*. Dalam pengerjaan ini, akan dibagi menjadi beberapa kasus yang akan dijelaskan pada sub bab berikutnya.

##### 4.12.1 Kondisi pada Analisis Tegangan dan Displasmen

Berikut ini beberapa kondisi yang akan dianalisis pada penelitian ini terkait dengan analisis tegangan dan displasmen, yang akan dijelaskan pada tabel di bawah:

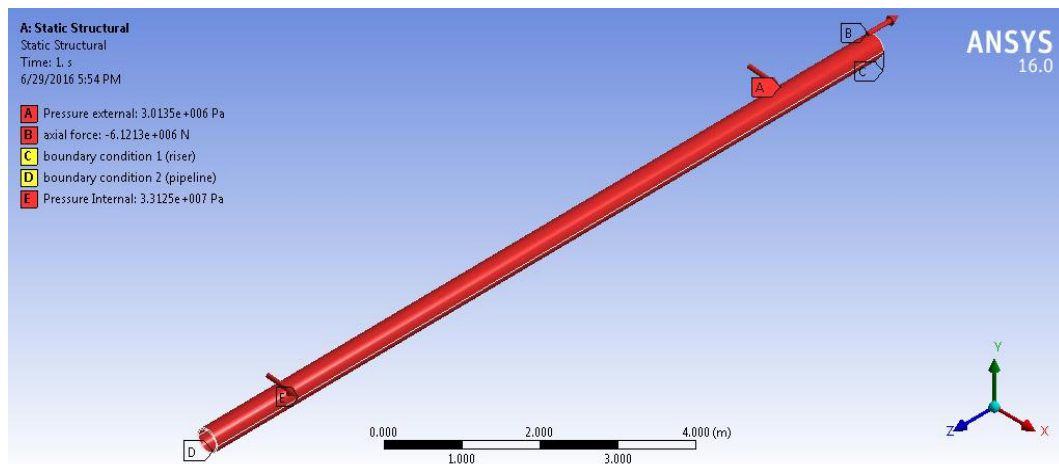
**Tabel 4.11** Kondisi pada Analisis Tegangan dan Displasmen

| Condition | SCR Tension  |
|-----------|--------------|
|           | N            |
| 1         | 0            |
| 2         | 323400       |
| 3         | Nilai Kritis |

Kondisi 1 menunjukkan analisis tegangan dan displasmen tanpa dipengaruhi oleh *tension* pada *steel catenary riser*, pembebanan hanya dari gaya aksial, tekanan eksternal, dan tekanan internal. Pembebanan yang sama berlaku pada kondisi 2 namun ditambahkan dengan *bottom tension* dari *steel catenary riser*. Kondisi 3 merupakan kondisi tambahan untuk mengetahui *tension* maksimal yang masih dapat ditoleransi.

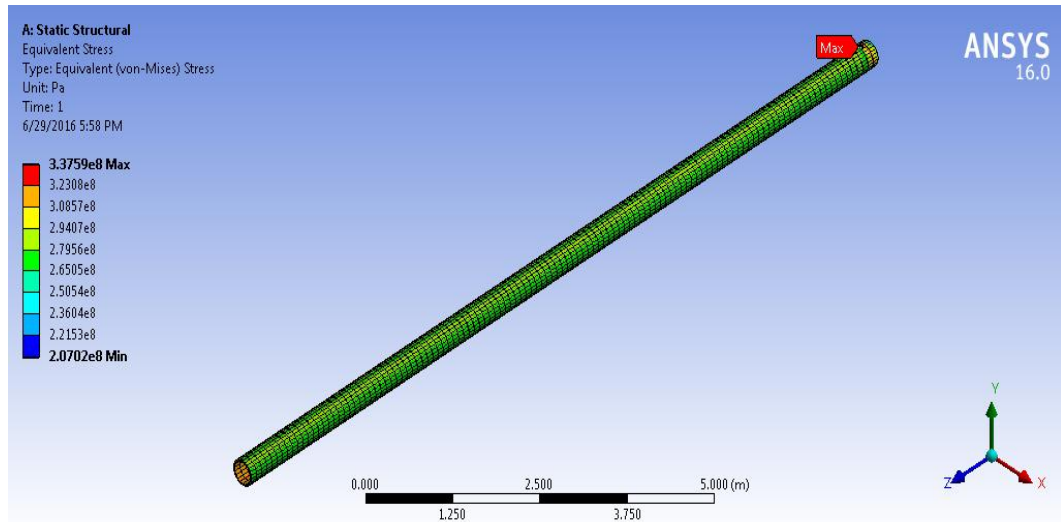
#### 4.12.2 Analisis Kondisi 1

Pada kondisi 1 analisis yang dilakukan tanpa memasukkan nilai *tension SCR*, hanya memasukkan gaya aksial sebesar 6121338 N (perhitungan pada lampiran), tekanan eksternal sebesar 3013500 Pa (perhitungan pada lampiran) dan tekanan internal sebesar 33125331,67 Pa (perhitungan pada lampiran) . Distribusi pembebanan akan ditampilkan pada gambar di bawah.



Gambar 4.22 Distribusi Pembebanan Kondisi 1

Tekanan eksternal mengarah ke seluruh bidang pipa bagian luar dan tekanan internal mengarah ke seluruh bidang pipa bagian dalam, sedangkan gaya aksial searah dengan arah ekspansi yaitu ke arah sumbu z negatif (sumbu pada *software*). Dan pada ujung pipa yang bersentuhan dengan *riser* (*boundary condition 1*) diasumsikan memiliki tumpuan *roll* sedangkan pada ujung lainnya yaitu *boundary condition 2* pipa diasumsikan tidak memiliki pergerakan arah z tetapi memiliki pergerakan arah x dan y. Sehingga didapatkan hasil *equivalent stress* (*von mises*) dan displasmen sebagai berikut:

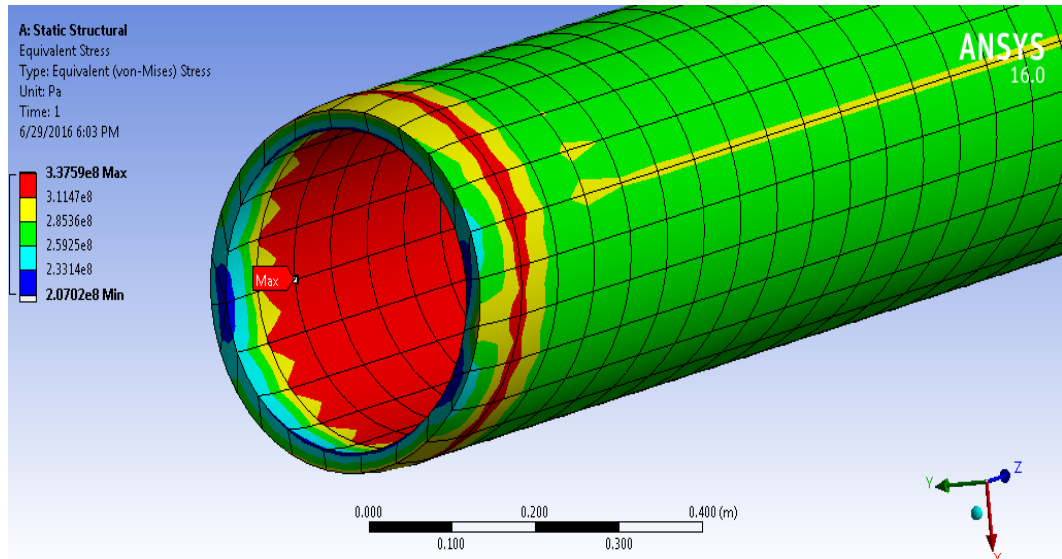


**Gambar 4.23** Hasil *Von Mises* yang Terjadi Sepanjang Pipa (Kondisi 1)

Untuk lebih jelasnya, tegangan yang terjadi sepanjang pipa akan disajikan dalam bentuk tabel di bawah ini:

**Tabel 4.12** Tegangan Kondisi 1 (Tanpa *Tension* SCR)

| SCR<br>Tension    | Eq. Stress | Allowable<br>Stress | Check |
|-------------------|------------|---------------------|-------|
|                   | Mpa        | Mpa                 |       |
| Tanpa tension SCR | 337,59     | 360                 | OK    |
|                   | 323,08     |                     | OK    |
|                   | 308,57     |                     | OK    |
|                   | 294,07     |                     | OK    |
|                   | 279,56     |                     | OK    |
|                   | 265,05     |                     | OK    |
|                   | 250,54     |                     | OK    |
|                   | 236,04     |                     | OK    |
|                   | 221,53     |                     | OK    |
|                   | 207,02     |                     | OK    |



**Gambar 4.24** Tegangan Maksimal (*Von Mises*) yang Terjadi (Kondisi 1)

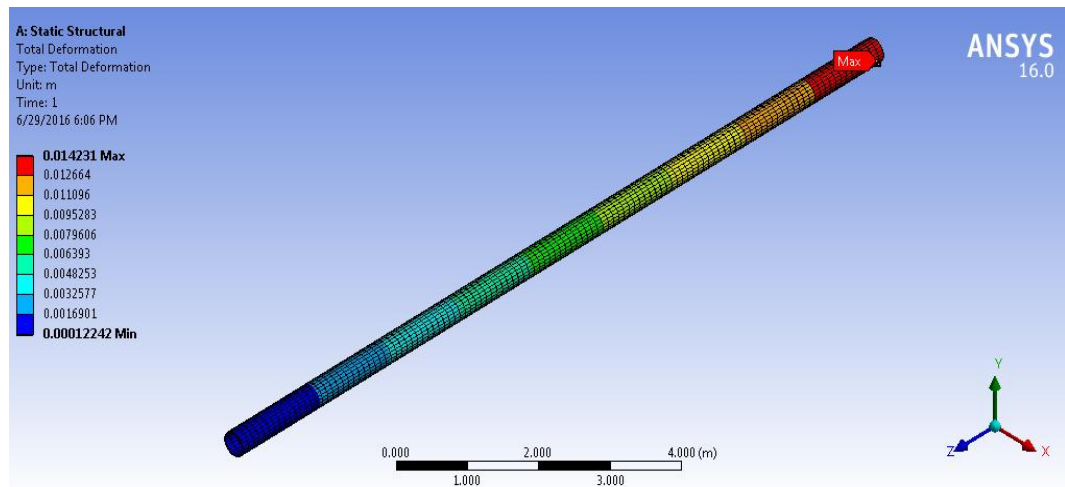
Setelah menjalankan *software* didapatkan tegangan maksimal yang terjadi pada bagian ujung pipa yang terletak dekat dengan *riser* dengan nilai sebesar 337,59 MPa. Menurut DNV OSF 101 “*Submarine Pipeline Systems*” tegangan *equivalent (von mises)* yang terjadi tidak boleh melebihi 80% SMYS, dalam kasus ini tegangan yang diijinkan adalah 360 MPa. Sehingga tegangan yang terjadi (337,59 MPa) di bawah *allowable stress*, artinya pipa masih aman bila dioperasikan dalam satu siklus.

Untuk memastikan apakah hasil perhitungan tegangan *von mises* dengan menggunakan *software* ANSYS di atas telah sesuai, maka perlu dilakukan perhitungan manual. Dan didapatkan hasil sebagai berikut:

**Tabel 4.13** Validasi *Von Mises* (Kondisi 1)

| <i>Von Mises</i> (Tanpa Tension) |             | Error (%)  |
|----------------------------------|-------------|------------|
| ANSYS                            | Manual      |            |
| 337,59                           | 332,4106752 | 1,55811024 |

Hasil perhitungan manual, didapatkan tegangan *von mises* sebesar 332,41 MPa, dengan rasio perbedaan sebesar 1,55 %. Maka dapat disimpulkan bahwa hasil analisis dengan menggunakan *software* ANSYS telah sesuai dengan perhitungan manual. Berikutnya adalah meninjau displasmen yang terjadi pada pipa seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.

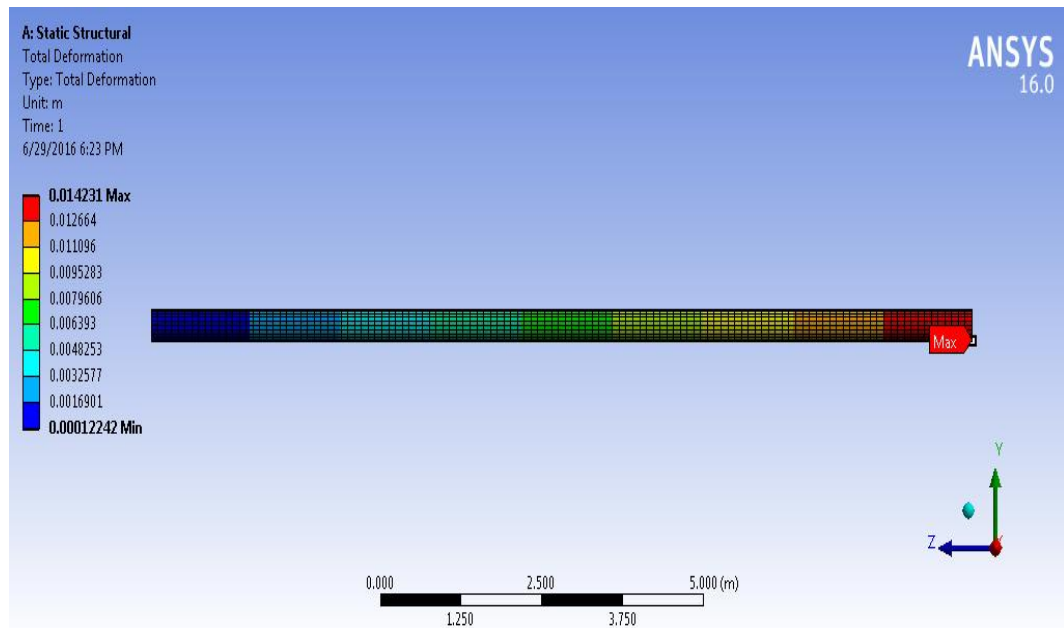


**Gambar 4.25** Displasmen yang Terjadi sepanjang Pipa (Kondisi 1)

Untuk lebih jelasnya, displasmen yang terjadi sepanjang pipa akan disajikan dalam bentuk tabel di bawah ini.

**Tabel 4.14** Displasmen pada Kondisi 1 (Tanpa *Tension* SCR)

| SCR<br>Tension    | Displacement |
|-------------------|--------------|
|                   | m            |
| Tanpa tension SCR | 0,014231     |
|                   | 0,012664     |
|                   | 0,011096     |
|                   | 0,0095283    |
|                   | 0,0079606    |
|                   | 0,006393     |
|                   | 0,0048253    |
|                   | 0,0032577    |
|                   | 0,0016901    |
|                   | 0,00012242   |

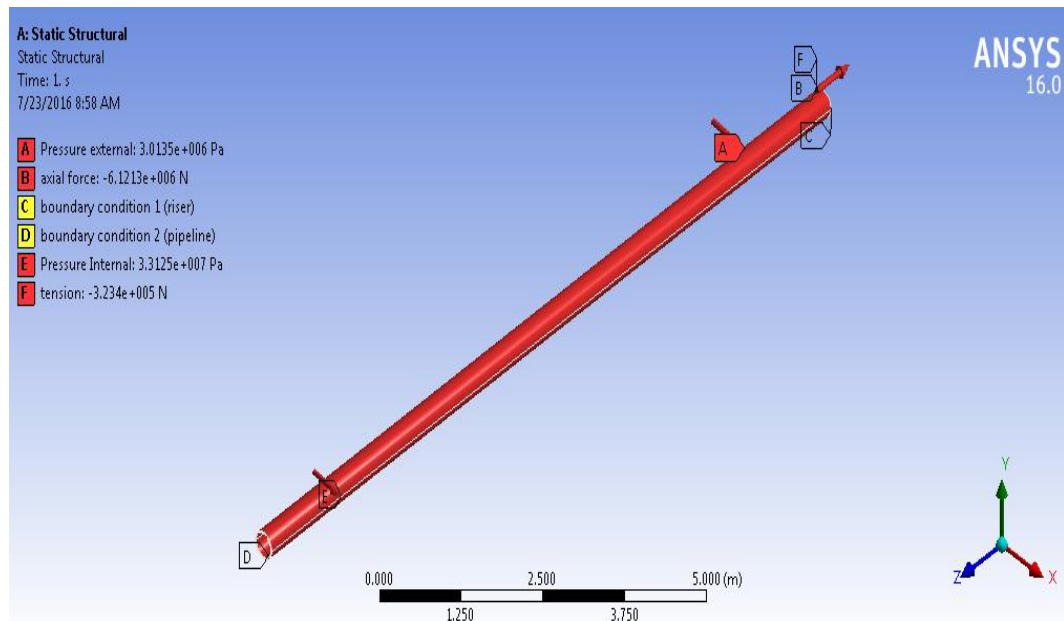


**Gambar 4.26** Displasmen Maksimal yang Terjadi (Kondisi 1)

Pada analisis displasmen ini didapatkan nilai maksimal sebesar 0,014231 m yang terjadi pada ujung pipa yang dekat dengan *riser (hot end)* hal ini terjadi akibat gaya aksial yang terjadi di sepanjang pipa yang meliputi tekanan internal dan ekspansi termal. Nilai displasmen secara berangsur menurun menuju ujung pipa lainnya.

#### 4.12.3 Analisis Kondisi 2

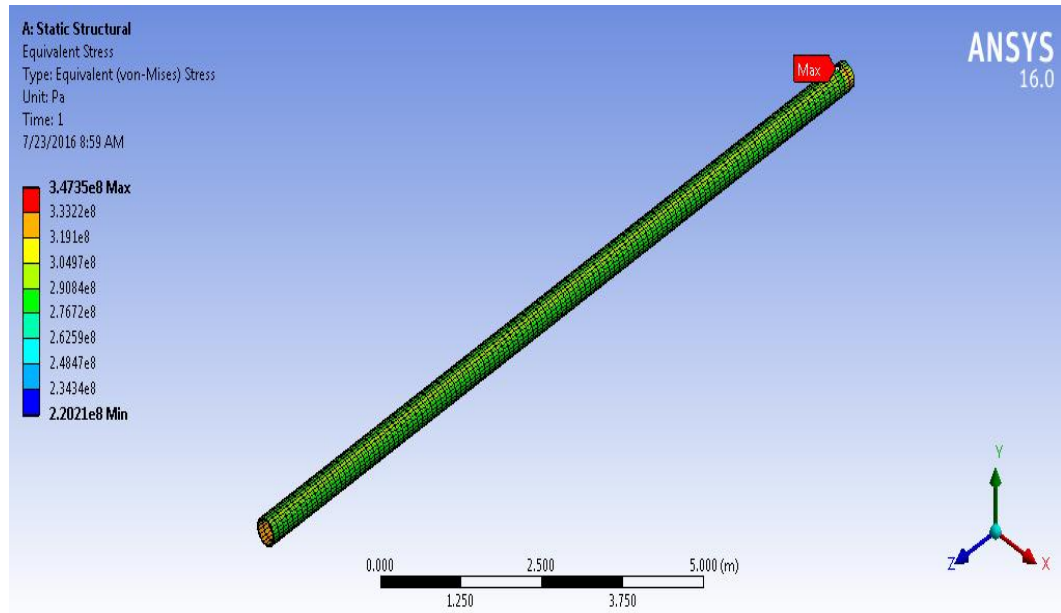
Pada kondisi ini, analisis yang dilakukan sudah memperhitungkan *tension* dari *steel catenary riser*. Berdasarkan perhitungan pada sub bab 4.10 terkait dengan nilai *tension*, didapatkan nilai *tension* yang terjadi sebesar 323400 N yang terjadi pada *hot end*. Selain itu pembebanan yang dimasukkan pada perhitungan sama seperti analisis pada kondisi 1 yaitu gaya aksial sebesar 6121338 N (perhitungan pada lampiran) dan tekanan eksternal sebesar 3013500 Pa (perhitungan pada lampiran) dan tekanan internal sebesar 33125331,67 Pa (perhitungan pada lampiran). Gambar di bawah ini menyajikan arah pembebanan yang dimasukkan pada *software* ANSYS.



**Gambar 4.27** Distribusi Pembebanan Kondisi 2

Seperti yang dapat dilihat pada gambar di atas, arah tekanan eksternal mengarah ke seluruh bidang pipa bagian luar yang diakibatkan oleh tekanan hidrostatik sama seperti tekanan internal yang mengarah ke seluruh bidang pipa bagian dalam. Sedangkan arah gaya aksial, yang diakibatkan oleh tekanan internal dan termal, yaitu searah dengan arah ekspansi pipa yang mengarah ke sumbu z negatif (pada sumbu *software*). Untuk *tension* yang diakibatkan oleh *steel catenary riser* memiliki arah yang sama dengan gaya aksial yaitu sumbu z negatif. Pada ujung pipa yang bersentuhan dengan *riser (boundary condition 1)* diasumsikan memiliki tumpuan *roll*, sedangkan pada ujung lainnya yaitu *boundary condition 2* pipa diasumsikan tidak memiliki pergerakan arah z tetapi memiliki pergerakan arah x dan y. Sehingga didapatkan hasil *equivalent stress (von mises)* dan displasmen sebagai berikut:





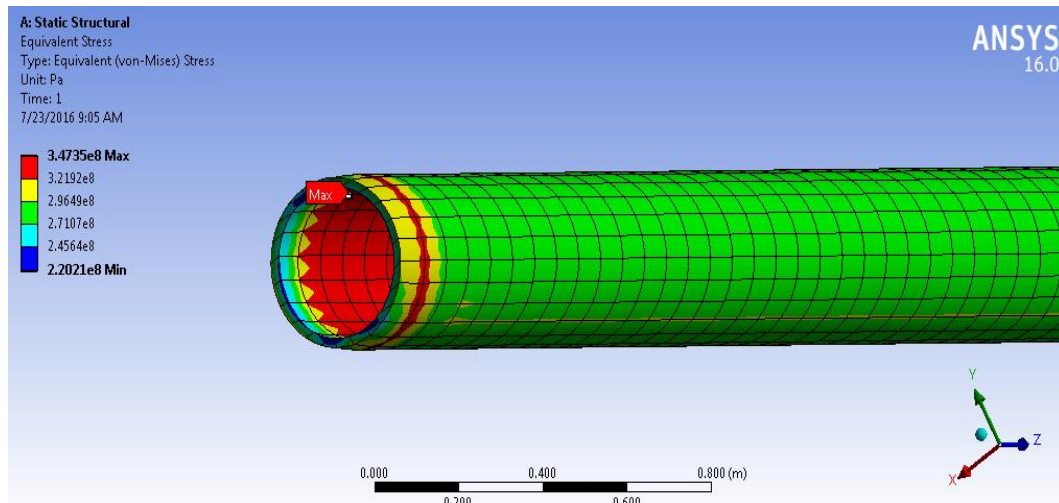
**Gambar 4.28** Hasil *Von Mises* yang Terjadi Sepanjang Pipa (Kondisi 2)

Untuk lebih jelasnya, tegangan yang terjadi sepanjang pipa akan disajikan dalam bentuk tabel di bawah ini:

**Tabel 4.15** Tegangan Kondisi 2 (*Tension* SCR = 323400 N)

| SCR<br>Tension | Eq. Stress | Allowable<br>Stress | Check |
|----------------|------------|---------------------|-------|
|                | Mpa        | Mpa                 |       |
| 323400 N       | 347,35     | 360                 | OK    |
|                | 333,22     |                     | OK    |
|                | 319,1      |                     | OK    |
|                | 304,97     |                     | OK    |
|                | 290,84     |                     | OK    |
|                | 276,72     |                     | OK    |
|                | 262,59     |                     | OK    |
|                | 248,47     |                     | OK    |
|                | 234,34     |                     | OK    |
|                | 220,21     |                     | OK    |

Pada tabel di atas terlihat bahwa tegangan *equivalent* maksimal yang terjadi adalah sebesar 347,35 MPa yang terletak pada ujung pipa yang dekat dengan riser. Sesuai dengan *codes* DNV OSF 101 “*Submarine Pipeline Systems*”, maka pipa tersebut masih aman untuk dioperasikan dalam satu siklus (*allowable stress* = 360 MPa).



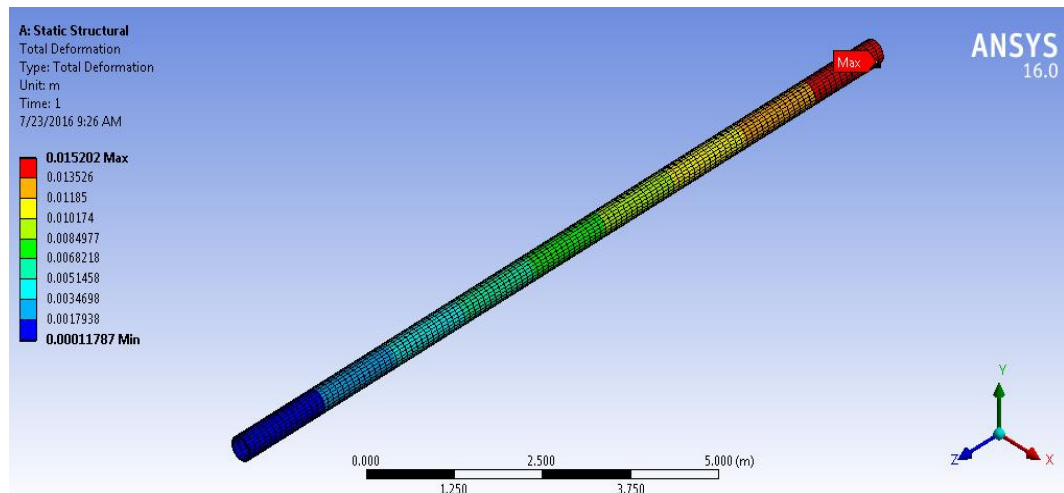
**Gambar 4.29** Tegangan Maksimal (*Von Mises*) yang Terjadi (Kondisi 2)

Untuk memastikan apakah hasil perhitungan tegangan *von mises* dengan menggunakan *software* ANSYS di atas telah sesuai, maka perlu dilakukan perhitungan manual. Dan didapatkan hasil sebagai berikut:

**Tabel 4.16** Validasi *Von Mises* (Kondisi 2)

| Von Mises (Dengan Tension) |             | Error (%) |
|----------------------------|-------------|-----------|
| ANSYS                      | Manual      |           |
| 347,35                     | 336,7832494 | 3,1375523 |

Hasil perhitungan manual, didapatkan tegangan *von mises* sebesar 336,78 MPa, dengan rasio perbedaan sebesar 3,13 %. Maka dapat disimpulkan bahwa hasil analisis dengan menggunakan *software* ANSYS telah sesuai dengan perhitungan manual. Setelah mendapatkan nilai tegangan, maka selanjutnya adalah meninjau displasmen yang terjadi pada pipa seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



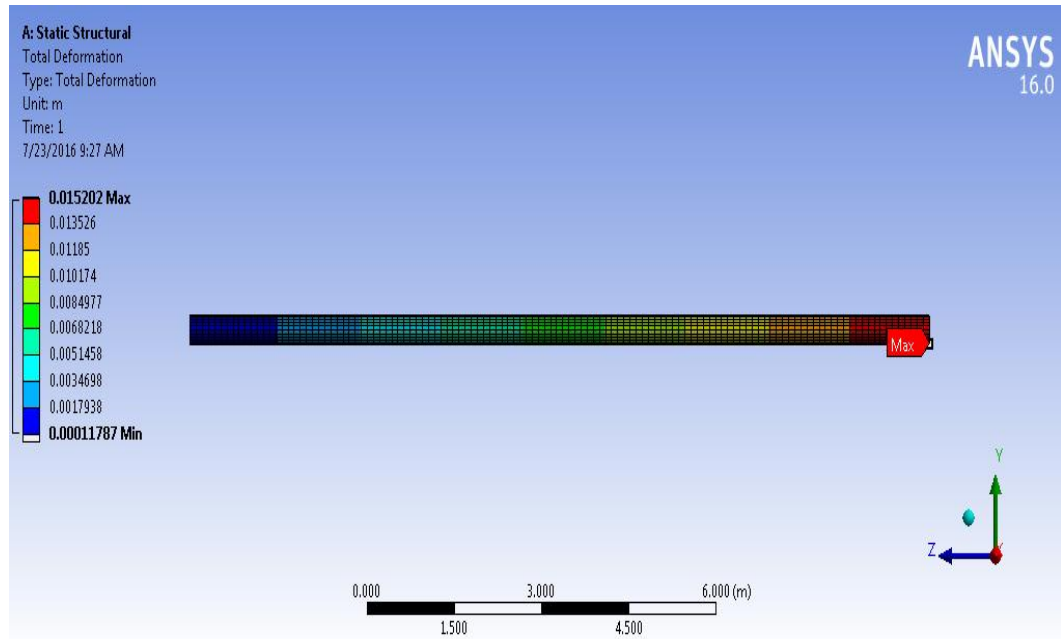
**Gambar 4.30** Displasmen yang Terjadi sepanjang Pipa (Kondisi 2)

Untuk lebih jelasnya, displasmen yang terjadi sepanjang pipa akan disajikan dalam bentuk tabel di bawah ini.

**Tabel 4.17** Displasmen pada Kondisi 2 ( $Tension\ SCR = 323400\ N$ )

| SCR Tension | Displacement |
|-------------|--------------|
|             | m            |
| 323400 N    | 0,015202     |
|             | 0,013526     |
|             | 0,01185      |
|             | 0,010174     |
|             | 0,0084977    |
|             | 0,0068218    |
|             | 0,0051458    |
|             | 0,0034698    |
|             | 0,0017938    |
|             | 0,00011787   |

Pada analisis displasmen ini didapatkan nilai maksimal sebesar 0,015202 m yang terjadi pada ujung pipa yang dekat dengan *riser* (*hot end*) hal ini terjadi akibat gaya aksial yang terjadi di sepanjang pipa dan *tension steel catenary riser*. Nilai displasmen secara berangsur menurun menuju ujung pipa lainnya (tumpuan *pinned*).



**Gambar 4.31** Displasmen Maksimal yang Terjadi (Kondisi 2)

#### 4.12.4 Analisis Kondisi 3

Setelah melakukan perhitungan pada kondisi 1 dan 2, didapatkan bahwa tegangan *equivalent* yang terjadi masih di bawah *allowable stress*. Analisis pada kondisi 3 dilakukan untuk mengetahui nilai kritis *tension* yaitu nilai maksimal yang mengakibatkan tegangan yang terjadi mendekati *allowble stress* bahkan sama, sehingga masih dapat ditoleransi. Perhitungan disajikan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 4.18** Nilai *Tension* Kritis

| Tension | Tension Stress      | Longitudinal Stress | Von Mises | Allowable Stress |
|---------|---------------------|---------------------|-----------|------------------|
| (N)     | (N/m <sup>2</sup> ) | (N/m <sup>2</sup> ) | (MPa)     | (MPa)            |
| 323400  | 11894158,60         | 308576634,86        | 336,78    | 360              |
| 1000000 | 36778474,35         | 333460950,61        | 347,07    |                  |
| 1500000 | 55167711,53         | 351850187,78        | 355,61    |                  |
| 1700000 | 62523406,40         | 359205882,65        | 359,23    |                  |
| 1730000 | 63626760,63         | 360309236,88        | 359,78    |                  |
| 1735000 | 63810653,00         | 360493129,26        | 359,87    |                  |
| 1740000 | 63994545,37         | 360677021,63        | 359,96    |                  |
| 1741000 | 64031323,84         | 360713800,10        | 359,98    |                  |
| 1741500 | 64049713,08         | 360732189,34        | 359,99    |                  |
| 1741600 | 64053390,93         | 360735867,19        | 359,99    |                  |
| 1741700 | 64057068,78         | 360739545,03        | 360,00    |                  |
| 1741800 | 64060746,62         | 360743222,88        | 360,00    |                  |
| 1741900 | 64064424,47         | 360746900,73        | 360,00    |                  |
| 1742000 | 64068102,32         | 360750578,58        | 360,00    |                  |
| 1742100 | 64071780,17         | 360754256,42        | 360,00    |                  |
| 1742200 | 64075458,01         | 360757934,27        | 360,01    |                  |

Dapat dilihat bahwa ketika pipa dikenakan *tension steel catenary riser* sebesar 1742200 N, maka tegangan *equivalent* yang terjadi adalah 360,61 MPa artinya pipa telah mengalami *overstress* karena melebihi *allowable stress*. Sehingga didapatkan nilai *tension* kritis pada penelitian ini yaitu sebesar 1742100 N.

**LAMPIRAN A**  
**RAO DAN SPEKTRA RESPON**

**RAO SURGE**

| Frequency | 45    | 90    | 180   |
|-----------|-------|-------|-------|
| 0.25      | 0.696 | 0.146 | 0.851 |
| 0.31      | 0.64  | 0.102 | 0.787 |
| 0.33      | 0.626 | 0.097 | 0.762 |
| 0.35      | 0.61  | 0.093 | 0.731 |
| 0.37      | 0.59  | 0.092 | 0.693 |
| 0.39      | 0.564 | 0.094 | 0.645 |
| 0.42      | 0.529 | 0.1   | 0.585 |
| 0.43      | 0.507 | 0.105 | 0.55  |
| 0.45      | 0.481 | 0.11  | 0.51  |
| 0.47      | 0.45  | 0.116 | 0.466 |
| 0.48      | 0.414 | 0.123 | 0.419 |
| 0.50      | 0.372 | 0.13  | 0.37  |
| 0.52      | 0.322 | 0.136 | 0.322 |
| 0.55      | 0.272 | 0.138 | 0.279 |
| 0.57      | 0.201 | 0.146 | 0.227 |
| 0.60      | 0.137 | 0.158 | 0.157 |
| 0.63      | 0.127 | 0.125 | 0.134 |
| 0.66      | 0.094 | 0.117 | 0.097 |
| 0.70      | 0.064 | 0.12  | 0.064 |
| 0.74      | 0.059 | 0.111 | 0.086 |
| 0.79      | 0.057 | 0.08  | 0.123 |
| 0.84      | 0.048 | 0.055 | 0.154 |
| 0.90      | 0.033 | 0.035 | 0.152 |
| 0.97      | 0.021 | 0.027 | 0.11  |
| 1.05      | 0.027 | 0.024 | 0.055 |
| 1.14      | 0.04  | 0.015 | 0.022 |
| 1.26      | 0.02  | 0.005 | 0.059 |
| 1.40      | 0.003 | 0.012 | 0.009 |
| 1.57      | 0.006 | 0.014 | 0.047 |
| 2.09      | 0.001 | 0.001 | 0.002 |

**RAO SWAY**

| Frequency | 45    | 90    | 180   |
|-----------|-------|-------|-------|
| 0.25      | 0.618 | 0.888 | 0.01  |
| 0.31      | 0.553 | 0.805 | 0.016 |
| 0.33      | 0.534 | 0.78  | 0.018 |
| 0.35      | 0.51  | 0.75  | 0.02  |
| 0.37      | 0.483 | 0.714 | 0.023 |
| 0.39      | 0.451 | 0.672 | 0.026 |
| 0.42      | 0.413 | 0.621 | 0.029 |
| 0.43      | 0.391 | 0.592 | 0.03  |
| 0.45      | 0.368 | 0.559 | 0.032 |
| 0.47      | 0.343 | 0.523 | 0.033 |
| 0.48      | 0.318 | 0.482 | 0.035 |
| 0.50      | 0.292 | 0.438 | 0.035 |
| 0.52      | 0.27  | 0.391 | 0.033 |
| 0.55      | 0.249 | 0.34  | 0.032 |
| 0.57      | 0.233 | 0.29  | 0.027 |
| 0.60      | 0.188 | 0.233 | 0.024 |
| 0.63      | 0.154 | 0.169 | 0.027 |
| 0.66      | 0.132 | 0.118 | 0.014 |
| 0.70      | 0.104 | 0.094 | 0.018 |
| 0.74      | 0.067 | 0.115 | 0.021 |
| 0.79      | 0.035 | 0.175 | 0.023 |
| 0.84      | 0.023 | 0.236 | 0.031 |
| 0.90      | 0.019 | 0.264 | 0.031 |
| 0.97      | 0.014 | 0.252 | 0.025 |
| 1.05      | 0.025 | 0.189 | 0.017 |
| 1.14      | 0.02  | 0.106 | 0.011 |
| 1.26      | 0.002 | 0.021 | 0.007 |
| 1.40      | 0.01  | 0.044 | 0.005 |
| 1.57      | 0.003 | 0.021 | 0.003 |
| 2.09      | 0.003 | 0.002 | 0.001 |

**RAO HEAVE**

| Frequency | 45    | 90    | 180   |
|-----------|-------|-------|-------|
| 0.25      | 0.588 | 0.57  | 0.588 |
| 0.31      | 0.707 | 0.701 | 0.737 |
| 0.33      | 0.703 | 0.7   | 0.743 |
| 0.35      | 0.691 | 0.693 | 0.746 |
| 0.37      | 0.671 | 0.68  | 0.747 |
| 0.39      | 0.64  | 0.659 | 0.747 |
| 0.42      | 0.594 | 0.629 | 0.744 |
| 0.43      | 0.564 | 0.608 | 0.742 |
| 0.45      | 0.528 | 0.583 | 0.737 |
| 0.47      | 0.484 | 0.551 | 0.729 |
| 0.48      | 0.434 | 0.512 | 0.715 |
| 0.50      | 0.38  | 0.462 | 0.691 |
| 0.52      | 0.326 | 0.401 | 0.654 |
| 0.55      | 0.285 | 0.33  | 0.602 |
| 0.57      | 0.268 | 0.248 | 0.533 |
| 0.60      | 0.308 | 0.091 | 0.48  |
| 0.63      | 0.332 | 0.091 | 0.384 |
| 0.66      | 0.32  | 0.091 | 0.3   |
| 0.70      | 0.289 | 0.091 | 0.214 |
| 0.74      | 0.214 | 0.073 | 0.142 |
| 0.79      | 0.141 | 0.079 | 0.089 |
| 0.84      | 0.076 | 0.092 | 0.079 |
| 0.90      | 0.037 | 0.098 | 0.072 |
| 0.97      | 0.029 | 0.085 | 0.064 |
| 1.05      | 0.036 | 0.064 | 0.046 |
| 1.14      | 0.031 | 0.043 | 0.037 |
| 1.26      | 0.014 | 0.006 | 0.029 |
| 1.40      | 0.01  | 0.015 | 0.014 |
| 1.57      | 0.003 | 0.012 | 0.004 |
| 2.09      | 0.001 | 0.001 | 0.001 |

**RAO ROLL**

| Frequency | 45    | 90    | 180   |
|-----------|-------|-------|-------|
| 0.25      | 0.305 | 0.376 | 0.137 |
| 0.31      | 0.366 | 0.487 | 0.046 |
| 0.33      | 0.393 | 0.525 | 0.038 |
| 0.35      | 0.424 | 0.567 | 0.031 |
| 0.37      | 0.458 | 0.613 | 0.025 |
| 0.39      | 0.494 | 0.664 | 0.019 |
| 0.42      | 0.533 | 0.719 | 0.013 |
| 0.43      | 0.552 | 0.747 | 0.011 |
| 0.45      | 0.571 | 0.775 | 0.011 |
| 0.47      | 0.588 | 0.803 | 0.014 |
| 0.48      | 0.604 | 0.831 | 0.019 |
| 0.50      | 0.616 | 0.853 | 0.026 |
| 0.52      | 0.628 | 0.876 | 0.033 |
| 0.55      | 0.638 | 0.893 | 0.041 |
| 0.57      | 0.646 | 0.906 | 0.05  |
| 0.60      | 0.715 | 0.936 | 0.047 |
| 0.63      | 0.696 | 0.942 | 0.054 |
| 0.66      | 0.712 | 0.95  | 0.067 |
| 0.70      | 0.719 | 0.953 | 0.077 |
| 0.74      | 0.69  | 0.911 | 0.08  |
| 0.79      | 0.621 | 0.8   | 0.079 |
| 0.84      | 0.505 | 0.623 | 0.065 |
| 0.90      | 0.368 | 0.399 | 0.052 |
| 0.97      | 0.241 | 0.151 | 0.037 |
| 1.05      | 0.159 | 0.058 | 0.019 |
| 1.14      | 0.083 | 0.113 | 0.007 |
| 1.26      | 0.038 | 0.1   | 0.007 |
| 1.40      | 0.013 | 0.05  | 0.009 |
| 1.57      | 0.003 | 0.012 | 0.005 |
| 2.09      | 0.003 | 0.005 | 0.001 |



**RAO PITCH**

| Frequency | 45    | 90    | 180   |
|-----------|-------|-------|-------|
| 0.25      | 0.106 | 0.098 | 0.126 |
| 0.31      | 0.111 | 0.052 | 0.144 |
| 0.33      | 0.125 | 0.05  | 0.159 |
| 0.35      | 0.142 | 0.051 | 0.178 |
| 0.37      | 0.162 | 0.054 | 0.198 |
| 0.39      | 0.185 | 0.059 | 0.22  |
| 0.42      | 0.211 | 0.067 | 0.242 |
| 0.43      | 0.224 | 0.072 | 0.252 |
| 0.45      | 0.237 | 0.078 | 0.26  |
| 0.47      | 0.249 | 0.085 | 0.266 |
| 0.48      | 0.258 | 0.092 | 0.267 |
| 0.50      | 0.263 | 0.1   | 0.262 |
| 0.52      | 0.26  | 0.106 | 0.249 |
| 0.55      | 0.248 | 0.109 | 0.228 |
| 0.57      | 0.226 | 0.106 | 0.201 |
| 0.60      | 0.207 | 0.11  | 0.185 |
| 0.63      | 0.175 | 0.102 | 0.166 |
| 0.66      | 0.138 | 0.096 | 0.146 |
| 0.70      | 0.097 | 0.079 | 0.123 |
| 0.74      | 0.051 | 0.058 | 0.095 |
| 0.79      | 0.011 | 0.039 | 0.065 |
| 0.84      | 0.017 | 0.02  | 0.039 |
| 0.90      | 0.023 | 0.023 | 0.013 |
| 0.97      | 0.03  | 0.031 | 0.021 |
| 1.05      | 0.032 | 0.022 | 0.021 |
| 1.14      | 0.016 | 0.008 | 0.006 |
| 1.26      | 0.013 | 0.007 | 0.006 |
| 1.40      | 0.012 | 0.002 | 0.004 |
| 1.57      | 0.004 | 0.001 | 0.001 |
| 2.09      | 0.001 | 0.002 | 0.001 |

**RAO YAW**

| Frequency | 45    | 90    | 180   |
|-----------|-------|-------|-------|
| 0.25      | 0.073 | 0.026 | 0.089 |
| 0.31      | 0.079 | 0.021 | 0.092 |
| 0.33      | 0.082 | 0.019 | 0.092 |
| 0.35      | 0.085 | 0.018 | 0.091 |
| 0.37      | 0.088 | 0.016 | 0.091 |
| 0.39      | 0.09  | 0.014 | 0.089 |
| 0.42      | 0.091 | 0.011 | 0.087 |
| 0.43      | 0.091 | 0.01  | 0.085 |
| 0.45      | 0.09  | 0.009 | 0.082 |
| 0.47      | 0.088 | 0.008 | 0.079 |
| 0.48      | 0.085 | 0.008 | 0.074 |
| 0.50      | 0.08  | 0.008 | 0.068 |
| 0.52      | 0.076 | 0.009 | 0.063 |
| 0.55      | 0.07  | 0.011 | 0.054 |
| 0.57      | 0.065 | 0.009 | 0.05  |
| 0.60      | 0.06  | 0.009 | 0.044 |
| 0.63      | 0.059 | 0.006 | 0.037 |
| 0.66      | 0.059 | 0.003 | 0.034 |
| 0.70      | 0.044 | 0.013 | 0.041 |
| 0.74      | 0.04  | 0.007 | 0.035 |
| 0.79      | 0.044 | 0.009 | 0.02  |
| 0.84      | 0.047 | 0.015 | 0.012 |
| 0.90      | 0.041 | 0.014 | 0.011 |
| 0.97      | 0.027 | 0.012 | 0.012 |
| 1.05      | 0.025 | 0.014 | 0.012 |
| 1.14      | 0.035 | 0.013 | 0.002 |
| 1.26      | 0.036 | 0.003 | 0.003 |
| 1.40      | 0.03  | 0.009 | 0.008 |
| 1.57      | 0.019 | 0.004 | 0.003 |
| 2.09      | 0.004 | 0.004 | 0.002 |

# RESPON GELOMBANG

|    | $\omega$ | $\omega_0$ | $\gamma$ | $\sigma$ | $S(\omega)$ |
|----|----------|------------|----------|----------|-------------|
| 1  | 0.25     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.0         |
| 2  | 0.31     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.00        |
| 3  | 0.33     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.00        |
| 4  | 0.35     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.00        |
| 5  | 0.37     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.01        |
| 6  | 0.39     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.06        |
| 7  | 0.42     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.24        |
| 8  | 0.43     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.42        |
| 9  | 0.45     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 0.68        |
| 10 | 0.47     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 1.02        |
| 11 | 0.48     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 1.44        |
| 12 | 0.50     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 1.91        |
| 13 | 0.52     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 2.37        |
| 14 | 0.55     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 2.78        |
| 15 | 0.57     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 3.08        |
| 16 | 0.60     | 0.61       | 1.23     | 0.07     | 3.23        |
| 17 | 0.63     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 3.22        |
| 18 | 0.66     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 3.04        |
| 19 | 0.70     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 2.72        |
| 20 | 0.74     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 2.32        |
| 21 | 0.79     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 1.88        |
| 22 | 0.84     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 1.46        |
| 23 | 0.90     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 1.09        |
| 24 | 0.97     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 0.78        |
| 25 | 1.05     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 0.54        |
| 26 | 1.14     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 0.36        |
| 27 | 1.26     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 0.23        |
| 28 | 1.40     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 0.14        |
| 29 | 1.57     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 0.08        |
| 30 | 2.09     | 0.61       | 1.23     | 0.09     | 0.02        |

# RESPON SPEKTRA GERAKAN SURGE

| Frekuensi | 45deg | Sr( $\omega$ ) | 90deg | Sr( $\omega$ ) | 180deg | Sr( $\omega$ ) |
|-----------|-------|----------------|-------|----------------|--------|----------------|
| 0.25      | 0.696 | 5.52023E-17    | 0.146 | 2.42909E-18    | 0.851  | 8.25273E-17    |
| 0.31      | 0.64  | 2.11152E-06    | 0.102 | 5.36335E-08    | 0.787  | 3.1929E-06     |
| 0.33      | 0.626 | 4.21654E-05    | 0.097 | 1.0124E-06     | 0.762  | 6.24766E-05    |
| 0.35      | 0.61  | 0.000515914    | 0.093 | 1.19918E-05    | 0.731  | 0.000740888    |
| 0.37      | 0.59  | 0.003957813    | 0.092 | 9.62336E-05    | 0.693  | 0.005460316    |
| 0.39      | 0.564 | 0.01997073     | 0.094 | 0.000554743    | 0.645  | 0.026118917    |
| 0.42      | 0.529 | 0.067933487    | 0.1   | 0.002427574    | 0.585  | 0.083077668    |
| 0.43      | 0.507 | 0.108421115    | 0.105 | 0.004650253    | 0.55   | 0.127591966    |
| 0.45      | 0.481 | 0.157698999    | 0.11  | 0.008247535    | 0.51   | 0.177287917    |
| 0.47      | 0.45  | 0.207531529    | 0.116 | 0.013790342    | 0.466  | 0.222551688    |
| 0.48      | 0.414 | 0.24715379     | 0.123 | 0.021816085    | 0.419  | 0.253159739    |
| 0.50      | 0.372 | 0.263734658    | 0.13  | 0.032208317    | 0.37   | 0.260906424    |
| 0.52      | 0.322 | 0.245489004    | 0.136 | 0.043792336    | 0.322  | 0.245489004    |
| 0.55      | 0.272 | 0.205519652    | 0.138 | 0.052902198    | 0.279  | 0.216233986    |
| 0.57      | 0.201 | 0.124447251    | 0.146 | 0.065659702    | 0.227  | 0.158724844    |
| 0.60      | 0.137 | 0.060698475    | 0.158 | 0.080732949    | 0.157  | 0.079714247    |
| 0.63      | 0.127 | 0.051890663    | 0.125 | 0.05026918     | 0.134  | 0.057768537    |
| 0.66      | 0.094 | 0.026838836    | 0.117 | 0.041579542    | 0.097  | 0.02857929     |
| 0.70      | 0.064 | 0.011157788    | 0.12  | 0.039226599    | 0.064  | 0.011157788    |
| 0.74      | 0.059 | 0.008081623    | 0.111 | 0.028604907    | 0.086  | 0.017170838    |
| 0.79      | 0.057 | 0.006122473    | 0.08  | 0.012060273    | 0.123  | 0.028509354    |
| 0.84      | 0.048 | 0.003366202    | 0.055 | 0.004419601    | 0.154  | 0.034649674    |
| 0.90      | 0.033 | 0.001184643    | 0.035 | 0.001332587    | 0.152  | 0.025133135    |
| 0.97      | 0.021 | 0.000344579    | 0.027 | 0.00056961     | 0.11   | 0.009454425    |
| 1.05      | 0.027 | 0.000395411    | 0.024 | 0.000312424    | 0.055  | 0.001640768    |
| 1.14      | 0.04  | 0.0005808      | 0.015 | 8.1675E-05     | 0.022  | 0.000175692    |
| 1.26      | 0.02  | 9.28825E-05    | 0.005 | 5.80515E-06    | 0.059  | 0.00080831     |
| 1.40      | 0.003 | 1.26303E-06    | 0.012 | 2.02084E-05    | 0.009  | 1.13672E-05    |
| 1.57      | 0.006 | 2.85219E-06    | 0.014 | 1.55286E-05    | 0.047  | 0.000175014    |
| 2.09      | 0.001 | 1.91699E-08    | 0.001 | 1.91699E-08    | 0.002  | 7.66796E-08    |

# RESPON SPEKTRA GERAKAN SWAY

| Frekuensi | 45deg | Sr( $\omega$ ) | 90deg | Sr( $\omega$ ) | 180deg | Sr( $\omega$ ) |
|-----------|-------|----------------|-------|----------------|--------|----------------|
| 0.25      | 0.618 | 4.35226E-17    | 0.888 | 8.98595E-17    | 0.01   | 1.13956E-20    |
| 0.31      | 0.553 | 1.57647E-06    | 0.805 | 3.34062E-06    | 0.016  | 1.3197E-09     |
| 0.33      | 0.534 | 3.06825E-05    | 0.78  | 6.54632E-05    | 0.018  | 3.4862E-08     |
| 0.35      | 0.51  | 0.000360627    | 0.75  | 0.000779902    | 0.02   | 5.54597E-07    |
| 0.37      | 0.483 | 0.00265244     | 0.714 | 0.005796258    | 0.023  | 6.0146E-06     |
| 0.39      | 0.451 | 0.012769939    | 0.672 | 0.028351385    | 0.026  | 4.24407E-05    |
| 0.42      | 0.413 | 0.041406895    | 0.621 | 0.093617225    | 0.029  | 0.000204159    |
| 0.43      | 0.391 | 0.064483925    | 0.592 | 0.14782278     | 0.03   | 0.000379612    |
| 0.45      | 0.368 | 0.092306954    | 0.559 | 0.212991563    | 0.032  | 0.000697973    |
| 0.47      | 0.343 | 0.120572231    | 0.523 | 0.280325391    | 0.033  | 0.001116058    |
| 0.48      | 0.318 | 0.145821255    | 0.482 | 0.335012236    | 0.035  | 0.001766455    |
| 0.50      | 0.292 | 0.162497629    | 0.438 | 0.365619665    | 0.035  | 0.002334627    |
| 0.52      | 0.27  | 0.172602797    | 0.391 | 0.361971031    | 0.033  | 0.002578387    |
| 0.55      | 0.249 | 0.172232158    | 0.34  | 0.321124456    | 0.032  | 0.002844563    |
| 0.57      | 0.233 | 0.167226475    | 0.29  | 0.259053336    | 0.027  | 0.00224554     |
| 0.60      | 0.188 | 0.114301609    | 0.233 | 0.175569264    | 0.024  | 0.00186277     |
| 0.63      | 0.154 | 0.076299768    | 0.169 | 0.091887235    | 0.027  | 0.002345359    |
| 0.66      | 0.132 | 0.052924387    | 0.118 | 0.04229334     | 0.014  | 0.000595339    |
| 0.70      | 0.104 | 0.029463534    | 0.094 | 0.024069877    | 0.018  | 0.000882598    |
| 0.74      | 0.067 | 0.010421835    | 0.115 | 0.030703668    | 0.021  | 0.001023843    |
| 0.79      | 0.035 | 0.002308412    | 0.175 | 0.057710289    | 0.023  | 0.000996857    |
| 0.84      | 0.023 | 0.000772882    | 0.236 | 0.08137326     | 0.031  | 0.001404045    |
| 0.90      | 0.019 | 0.000392705    | 0.264 | 0.075817129    | 0.031  | 0.001045401    |
| 0.97      | 0.014 | 0.000153146    | 0.252 | 0.049619324    | 0.025  | 0.000488348    |
| 1.05      | 0.025 | 0.000339002    | 0.189 | 0.019375163    | 0.017  | 0.000156754    |
| 1.14      | 0.02  | 0.0001452      | 0.106 | 0.00407867     | 0.011  | 4.3923E-05     |
| 1.26      | 0.002 | 9.28825E-07    | 0.021 | 0.000102403    | 0.007  | 1.13781E-05    |
| 1.40      | 0.01  | 1.40336E-05    | 0.044 | 0.000271691    | 0.005  | 3.5084E-06     |
| 1.57      | 0.003 | 7.13048E-07    | 0.021 | 3.49393E-05    | 0.003  | 7.13048E-07    |
| 2.09      | 0.003 | 1.72529E-07    | 0.002 | 7.66796E-08    | 0.001  | 1.91699E-08    |

# RESPON SPEKTRA GERAKAN HEAVE

| Frekuensi | 45deg | Sr( $\omega$ ) | 90deg | Sr( $\omega$ ) | 180deg | Sr( $\omega$ ) |
|-----------|-------|----------------|-------|----------------|--------|----------------|
| 0.25      | 0.588 | 3.93997E-17    | 0.57  | 3.70244E-17    | 0.588  | 3.93997E-17    |
| 0.31      | 0.707 | 2.57676E-06    | 0.701 | 2.53321E-06    | 0.737  | 2.80008E-06    |
| 0.33      | 0.703 | 5.31763E-05    | 0.7   | 5.27234E-05    | 0.743  | 5.93999E-05    |
| 0.35      | 0.691 | 0.000662024    | 0.693 | 0.000665862    | 0.746  | 0.000771605    |
| 0.37      | 0.671 | 0.005119132    | 0.68  | 0.005257377    | 0.747  | 0.006344428    |
| 0.39      | 0.64  | 0.025715542    | 0.659 | 0.027265067    | 0.747  | 0.035032969    |
| 0.42      | 0.594 | 0.085653567    | 0.629 | 0.0960448      | 0.744  | 0.134374987    |
| 0.43      | 0.564 | 0.134170229    | 0.608 | 0.155921179    | 0.742  | 0.232223284    |
| 0.45      | 0.528 | 0.190023201    | 0.583 | 0.231673252    | 0.737  | 0.370231836    |
| 0.47      | 0.484 | 0.240076572    | 0.551 | 0.311144592    | 0.729  | 0.544645745    |
| 0.48      | 0.434 | 0.271610185    | 0.512 | 0.378012808    | 0.715  | 0.737188712    |
| 0.50      | 0.38  | 0.275200056    | 0.462 | 0.406785324    | 0.691  | 0.909991676    |
| 0.52      | 0.326 | 0.251625992    | 0.401 | 0.38072294     | 0.654  | 1.012688311    |
| 0.55      | 0.285 | 0.225634377    | 0.33  | 0.302512572    | 0.602  | 1.006719615    |
| 0.57      | 0.268 | 0.221239558    | 0.248 | 0.189450849    | 0.533  | 0.875079705    |
| 0.60      | 0.308 | 0.306787795    | 0.091 | 0.026780546    | 0.48   | 0.745107818    |
| 0.63      | 0.332 | 0.354615687    | 0.091 | 0.026641861    | 0.384  | 0.474399502    |
| 0.66      | 0.32  | 0.311034046    | 0.091 | 0.025153056    | 0.3    | 0.273369767    |
| 0.70      | 0.289 | 0.227516998    | 0.091 | 0.022558018    | 0.214  | 0.124751481    |
| 0.74      | 0.214 | 0.106321754    | 0.073 | 0.012372011    | 0.142  | 0.046813518    |
| 0.79      | 0.141 | 0.037464106    | 0.079 | 0.01176065     | 0.089  | 0.014926472    |
| 0.84      | 0.076 | 0.008438882    | 0.092 | 0.012366117    | 0.079  | 0.009118258    |
| 0.90      | 0.037 | 0.001489234    | 0.098 | 0.010447482    | 0.072  | 0.005639291    |
| 0.97      | 0.029 | 0.000657122    | 0.085 | 0.005645308    | 0.064  | 0.00320044     |
| 1.05      | 0.036 | 0.000702954    | 0.064 | 0.002221681    | 0.046  | 0.001147724    |
| 1.14      | 0.031 | 0.000348843    | 0.043 | 0.000671187    | 0.037  | 0.000496947    |
| 1.26      | 0.014 | 4.55124E-05    | 0.006 | 8.35942E-06    | 0.029  | 0.000195285    |
| 1.40      | 0.01  | 1.40336E-05    | 0.015 | 3.15756E-05    | 0.014  | 2.75059E-05    |
| 1.57      | 0.003 | 7.13048E-07    | 0.012 | 1.14088E-05    | 0.004  | 1.26764E-06    |
| 2.09      | 0.001 | 1.91699E-08    | 0.001 | 1.91699E-08    | 0.001  | 1.91699E-08    |

### RESPON SPEKTRA GERAKAN ROLL

| Frekuensi | 45deg | Sr( $\omega$ ) | 90deg | Sr( $\omega$ ) | 180deg | Sr( $\omega$ ) |
|-----------|-------|----------------|-------|----------------|--------|----------------|
| 0.25      | 0.305 | 1.06008E-17    | 0.376 | 1.61E-17       | 0.137  | 2.13885E-18    |
| 0.31      | 0.366 | 6.90554E-07    | 0.487 | 1.22E-06       | 0.046  | 1.09081E-08    |
| 0.33      | 0.393 | 1.66185E-05    | 0.525 | 2.97E-05       | 0.038  | 1.55373E-07    |
| 0.35      | 0.424 | 0.000249258    | 0.567 | 0.000446       | 0.031  | 1.33242E-06    |
| 0.37      | 0.458 | 0.002384966    | 0.613 | 0.004272       | 0.025  | 7.1061E-06     |
| 0.39      | 0.494 | 0.015321089    | 0.664 | 0.02768        | 0.019  | 2.26643E-05    |
| 0.42      | 0.533 | 0.068964721    | 0.719 | 0.125496       | 0.013  | 4.1026E-05     |
| 0.43      | 0.552 | 0.128521595    | 0.747 | 0.235364       | 0.011  | 5.10368E-05    |
| 0.45      | 0.571 | 0.222234255    | 0.775 | 0.409395       | 0.011  | 8.24753E-05    |
| 0.47      | 0.588 | 0.354334721    | 0.803 | 0.660831       | 0.014  | 0.00020087     |
| 0.48      | 0.604 | 0.526066286    | 0.831 | 0.995792       | 0.019  | 0.000520564    |
| 0.50      | 0.616 | 0.723173909    | 0.853 | 1.38669        | 0.026  | 0.001288333    |
| 0.52      | 0.628 | 0.933769293    | 0.876 | 1.816889       | 0.033  | 0.002578387    |
| 0.55      | 0.638 | 1.130724768    | 0.893 | 2.215228       | 0.041  | 0.004669639    |
| 0.57      | 0.646 | 1.285459001    | 0.906 | 2.528422       | 0.05   | 0.007700753    |
| 0.60      | 0.715 | 1.65328882     | 0.936 | 2.833272       | 0.047  | 0.007143851    |
| 0.63      | 0.696 | 1.558476489    | 0.942 | 2.854852       | 0.054  | 0.009381435    |
| 0.66      | 0.712 | 1.539812923    | 0.95  | 2.741291       | 0.067  | 0.013635076    |
| 0.70      | 0.719 | 1.408237624    | 0.953 | 2.474024       | 0.077  | 0.016151007    |
| 0.74      | 0.69  | 1.105332064    | 0.911 | 1.926776       | 0.08   | 0.014858486    |
| 0.79      | 0.621 | 0.726708684    | 0.8   | 1.206027       | 0.079  | 0.01176065     |
| 0.84      | 0.505 | 0.372597955    | 0.623 | 0.567066       | 0.065  | 0.006172832    |
| 0.90      | 0.368 | 0.147317765    | 0.399 | 0.173183       | 0.052  | 0.002941482    |
| 0.97      | 0.241 | 0.045382022    | 0.151 | 0.017816       | 0.037  | 0.001069678    |
| 1.05      | 0.159 | 0.01371248     | 0.058 | 0.001825       | 0.019  | 0.000195807    |
| 1.14      | 0.083 | 0.002500708    | 0.113 | 0.004635       | 0.007  | 1.7787E-05     |
| 1.26      | 0.038 | 0.000335306    | 0.1   | 0.002322       | 0.007  | 1.13781E-05    |
| 1.40      | 0.013 | 2.37168E-05    | 0.05  | 0.000351       | 0.009  | 1.13672E-05    |
| 1.57      | 0.003 | 7.13048E-07    | 0.012 | 1.14E-05       | 0.005  | 1.98069E-06    |
| 2.09      | 0.003 | 1.72529E-07    | 0.005 | 4.79E-07       | 0.001  | 1.91699E-08    |

# RESPON SPEKTRA GERAKAN PITCH

| Frekuensi | 45deg | Sr( $\omega$ ) | 90deg | Sr( $\omega$ ) | 180deg | Sr( $\omega$ ) |
|-----------|-------|----------------|-------|----------------|--------|----------------|
| 0.25      | 0.106 | 1.28041E-18    | 0.098 | 1.09444E-18    | 0.126  | 1.80917E-18    |
| 0.31      | 0.111 | 6.35157E-08    | 0.052 | 1.39393E-08    | 0.144  | 1.06896E-07    |
| 0.33      | 0.125 | 1.68123E-06    | 0.05  | 2.68997E-07    | 0.159  | 2.72021E-06    |
| 0.35      | 0.142 | 2.79572E-05    | 0.051 | 3.60627E-06    | 0.178  | 4.39296E-05    |
| 0.37      | 0.162 | 0.000298388    | 0.054 | 3.31542E-05    | 0.198  | 0.00044574     |
| 0.39      | 0.185 | 0.002148717    | 0.059 | 0.000218544    | 0.22   | 0.003038653    |
| 0.42      | 0.211 | 0.010807804    | 0.067 | 0.001089738    | 0.242  | 0.014216847    |
| 0.43      | 0.224 | 0.021163817    | 0.072 | 0.002186568    | 0.252  | 0.026785455    |
| 0.45      | 0.237 | 0.038285602    | 0.078 | 0.004146942    | 0.26   | 0.046077136    |
| 0.47      | 0.249 | 0.063541542    | 0.085 | 0.00740452     | 0.266  | 0.072514078    |
| 0.48      | 0.258 | 0.095985582    | 0.092 | 0.012205125    | 0.267  | 0.102799053    |
| 0.50      | 0.263 | 0.131823495    | 0.1   | 0.019058176    | 0.262  | 0.130822941    |
| 0.52      | 0.26  | 0.160054171    | 0.106 | 0.026603087    | 0.249  | 0.146797613    |
| 0.55      | 0.248 | 0.170851545    | 0.109 | 0.033004149    | 0.228  | 0.144406001    |
| 0.57      | 0.226 | 0.157329467    | 0.106 | 0.034610265    | 0.201  | 0.124447251    |
| 0.60      | 0.207 | 0.138572591    | 0.11  | 0.039131096    | 0.185  | 0.110682791    |
| 0.63      | 0.175 | 0.098527593    | 0.102 | 0.033472035    | 0.166  | 0.088653922    |
| 0.66      | 0.138 | 0.057845043    | 0.096 | 0.027993064    | 0.146  | 0.064746111    |
| 0.70      | 0.097 | 0.025630769    | 0.079 | 0.017000917    | 0.123  | 0.041212445    |
| 0.74      | 0.051 | 0.006038582    | 0.058 | 0.007809992    | 0.095  | 0.020952787    |
| 0.79      | 0.011 | 0.000228015    | 0.039 | 0.002866199    | 0.065  | 0.007961664    |
| 0.84      | 0.017 | 0.000422236    | 0.02  | 0.00058441     | 0.039  | 0.002222219    |
| 0.90      | 0.023 | 0.00057546     | 0.023 | 0.00057546     | 0.013  | 0.000183843    |
| 0.97      | 0.03  | 0.000703222    | 0.031 | 0.000750885    | 0.021  | 0.000344579    |
| 1.05      | 0.032 | 0.00055542     | 0.022 | 0.000262523    | 0.021  | 0.0002392      |
| 1.14      | 0.016 | 9.2928E-05     | 0.008 | 2.3232E-05     | 0.006  | 1.3068E-05     |
| 1.26      | 0.013 | 3.92428E-05    | 0.007 | 1.13781E-05    | 0.006  | 8.35942E-06    |
| 1.40      | 0.012 | 2.02084E-05    | 0.002 | 5.61345E-07    | 0.004  | 2.24538E-06    |
| 1.57      | 0.004 | 1.26764E-06    | 0.001 | 7.92275E-08    | 0.001  | 7.92275E-08    |
| 2.09      | 0.001 | 1.91699E-08    | 0.002 | 7.66796E-08    | 0.001  | 1.91699E-08    |

# RESPON SPEKTRA GERAKAN YAW

| Frekuensi | 45deg | Sr( $\omega$ ) | 90deg | Sr( $\omega$ ) | 180deg | Sr( $\omega$ ) |
|-----------|-------|----------------|-------|----------------|--------|----------------|
| 0.25      | 0.073 | 6.07273E-19    | 0.026 | 7.70345E-20    | 0.089  | 9.02648E-19    |
| 0.31      | 0.079 | 3.21729E-08    | 0.021 | 2.27339E-09    | 0.092  | 4.36326E-08    |
| 0.33      | 0.082 | 7.23495E-07    | 0.019 | 3.88432E-08    | 0.092  | 9.10717E-07    |
| 0.35      | 0.085 | 1.00174E-05    | 0.018 | 4.49224E-07    | 0.091  | 1.14815E-05    |
| 0.37      | 0.088 | 8.80474E-05    | 0.016 | 2.91066E-06    | 0.091  | 9.4153E-05     |
| 0.39      | 0.09  | 0.000508535    | 0.014 | 1.23053E-05    | 0.089  | 0.000497297    |
| 0.42      | 0.091 | 0.002010274    | 0.011 | 2.93737E-05    | 0.087  | 0.001837431    |
| 0.43      | 0.091 | 0.003492856    | 0.01  | 4.21792E-05    | 0.085  | 0.003047444    |
| 0.45      | 0.09  | 0.005521077    | 0.009 | 5.52108E-05    | 0.082  | 0.004583176    |
| 0.47      | 0.088 | 0.007936416    | 0.008 | 6.55902E-05    | 0.079  | 0.00639607     |
| 0.48      | 0.085 | 0.010418482    | 0.008 | 9.22883E-05    | 0.074  | 0.007896416    |
| 0.50      | 0.08  | 0.012197232    | 0.008 | 0.000121972    | 0.068  | 0.0088125      |
| 0.52      | 0.076 | 0.013675634    | 0.009 | 0.000191781    | 0.063  | 0.009397263    |
| 0.55      | 0.07  | 0.013611677    | 0.011 | 0.000336125    | 0.054  | 0.008100337    |
| 0.57      | 0.065 | 0.013014273    | 0.009 | 0.000249504    | 0.05   | 0.007700753    |
| 0.60      | 0.06  | 0.01164231     | 0.009 | 0.000261952    | 0.044  | 0.006260975    |
| 0.63      | 0.059 | 0.011199169    | 0.006 | 0.00011582     | 0.037  | 0.004404384    |
| 0.66      | 0.059 | 0.010573335    | 0.003 | 2.7337E-05     | 0.034  | 0.003511283    |
| 0.70      | 0.044 | 0.005273798    | 0.013 | 0.000460368    | 0.041  | 0.004579161    |
| 0.74      | 0.04  | 0.003714622    | 0.007 | 0.00011376     | 0.035  | 0.002844007    |
| 0.79      | 0.044 | 0.003648232    | 0.009 | 0.000152638    | 0.02   | 0.000753767    |
| 0.84      | 0.047 | 0.003227405    | 0.015 | 0.000328731    | 0.012  | 0.000210388    |
| 0.90      | 0.041 | 0.001828636    | 0.014 | 0.000213214    | 0.011  | 0.000131627    |
| 0.97      | 0.027 | 0.00056961     | 0.012 | 0.000112515    | 0.012  | 0.000112515    |
| 1.05      | 0.025 | 0.000339002    | 0.014 | 0.000106311    | 0.012  | 7.8106E-05     |
| 1.14      | 0.035 | 0.000444675    | 0.013 | 6.1347E-05     | 0.002  | 1.452E-06      |
| 1.26      | 0.036 | 0.000300939    | 0.003 | 2.08986E-06    | 0.003  | 2.08986E-06    |
| 1.40      | 0.03  | 0.000126303    | 0.009 | 1.13672E-05    | 0.008  | 8.98151E-06    |
| 1.57      | 0.019 | 2.86011E-05    | 0.004 | 1.26764E-06    | 0.003  | 7.13048E-07    |
| 2.09      | 0.004 | 3.06718E-07    | 0.004 | 3.06718E-07    | 0.002  | 7.66796E-08    |



**LAMPIRAN B**

**PERHITUNGAN *WALKING PER CYCLE*,  
TEGANGAN, DAN DISPLASMEN**

# Submerged weight

$$Ws = (Ms + Mcontent + Mconcrete).g - Bf .$$

keterangan:

Ms = Steel Mass  
 Content  
 Mcont = Mass  
 Mconcrete = Mass  
 = Concrete  
 g = gravitasi  
 bouyancy  
 Bf = force

|             |   |          |                   |
|-------------|---|----------|-------------------|
| Di          | = | 0.3175   | m                 |
| Do steel    | = | 0.3556   | m                 |
| Do concrete | = | 0.4736   | m                 |
| psteel      | = | 7850     | kg/m <sup>3</sup> |
| Lpj         | = | 12.1     | m                 |
| Field joint | = | 0.3      | m                 |
| ρ water     | = | 1025     | kg/m <sup>3</sup> |
| ρ content   | = | 824.9427 | kg/m <sup>3</sup> |
| ρ concrete  | = | 3044     | kg/m <sup>3</sup> |
| G           | = | 9.8      | m/s <sup>2</sup>  |

## 1. steel mass

$$Ms = \frac{\pi (D^2 - Di^2). \rho_{st}}{4}$$

$$Ms = 158.0315791 \text{ kg/m}$$

## 2. content mass

$$Mcont = \frac{\pi . Di^2 . Pcontent}{4}$$

$$Mcont = 65.28011684 \text{ kg/m}$$

## 3. concrete mass

$$Mconcrete = \frac{\pi . (Dconc^2 - Dosteel^2) \rho}{4}$$

$$Mconcrete = 233.805975 \text{ kg/m}$$

## 4. Bouyancy force

$$Bf = \frac{\pi . Dt^2 . \rho_{water} . g}{4}$$

$$Bf = 1768.654426 \text{ N/m}$$

Ws yang didapatkan adalah

$$2711.1 \text{ N/m}$$

# Perhitungan Regangan (Strain)

## PADA HOT END

Diketahui:

|             |   |             |
|-------------|---|-------------|
| Di          | = | 0.3175 m    |
| Do steel    | = | 0.3556 m    |
| Do concrete | = | 0.4736 m    |
| E           | = | 2.07E+11 Pa |
| t           | = | 0.01905 m   |
| v           | = | 0.3         |
| α           | = | 0.0000117   |

## Cross sectional area of steel

$$A_s = \pi \cdot (D - t) \cdot t$$

$$A_s = 0.02718982 \text{ m}^2$$

## Internal sectional area

$$A_i = \pi/4 \cdot (D - 2t)^2$$

$$= 0.1488833$$

|            |   |             |
|------------|---|-------------|
| d          | = | 300 m       |
| Tambient   | = | 15 °C       |
| Toperation | = | 78 °C       |
| Pdesain    | = | 307 bar     |
|            | = | 30700000 Pa |

|     |   |  |
|-----|---|--|
| Po  | = | pwater . g . H   |
|     | = | 1025 . 9.8 . 300   |
|     | = | 3013500 N/m <sup>2</sup>   |
| Pin | = | Pd + pcont . g . d   |
|     | = | 307 x 10 <sup>5</sup> + 824.9427 . 9.8 . 300                               |
|     | = | 33125331.67 N/m <sup>2</sup>   |
| σh  | = | $\frac{(P_i - P_e) \times D - t^2}{2 \times t^2}$                          |
|     | = | $\frac{(33123359.06 - 3013500) \times 0.4736 - 0.01905}{2 \times 0.01905}$ |
|     | = | 359247587.5 N/m <sup>2</sup>   |

## 1. End cap Strain

$$\epsilon_{end\ cap} = \frac{\Delta P \cdot D}{4t \cdot E}$$

$$\epsilon_E = \frac{(33125331.67 - 3013500) \times 0.3175}{4 \times 0.01905 \times 207 \times 10^9}$$

$$= 0.00060612$$

## 2. Poisson strain

$$\epsilon_{poisson} = -\frac{v\sigma_H}{E}$$

$$\epsilon_v = \frac{-(0.3 \times 359247587.5)}{207 \times 10^9}$$

$$= -0.00052065$$

## 3. Temperatur strain

$$\epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\epsilon_T = 0.0000117 \cdot (78 - 15)$$

$$\epsilon_T = 0.0007371$$

sehingga total regangan yang terjadi,

$$\epsilon_{total} = \frac{\sigma_H (1 - 2v)}{2E} + \alpha_T \Delta T$$

$$\epsilon_{total} = 0.001084199$$

# Perhitungan Regangan (Strain)

## PADA COLD END

Diketahui:

$$\begin{aligned} D_i &= 0.3175 \text{ M} \\ D_o \text{ steel} &= 0.3556 \text{ M} \\ D_o \text{ concrete} &= 0.4736 \text{ M} \\ E &= 2.07 \times 10^{11} \text{ Pa} \\ t &= 0.01905 \text{ M} \\ \nu &= 0.3 \\ \alpha &= 0.0000117 \end{aligned}$$

## Cross sectional area of steel

$$A_s = \pi \cdot (D - t) \cdot t$$

$$A_s = 0.02718982 \text{ m}^2$$

## Internal sectional area

$$\begin{aligned} A_i &= \pi/4 \cdot (D - 2t)^2 \\ &= 0.1488833 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d &= 300 \text{ m} \\ T_{\text{ambient}} &= 15^\circ \text{C} \\ T_{\text{operation}} &= 15^\circ \text{C} \\ P_{\text{desain}} &= 307 \text{ bar} \\ &= 30700000 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_o &= p_{\text{water}} \cdot g \cdot H \\ &= 1025 \cdot 9.8 \cdot 300 \\ &= 3013500 \text{ N/m}^2 \\ P_{\text{in}} &= P_d + p_{\text{cont}} \cdot g \cdot d \\ &= 307 \times 10^5 + 824.9427 \cdot 9.8 \cdot 300 \\ &= 33125331.67 \text{ N/m}^2 \\ \sigma_h &= \frac{(P_i - P_o) \cdot D - t^2}{2 \times t^2} \\ &= \frac{(33125331.67 - 3013500) \times 0.4736 - 0.01905}{2 \times 0.01905} \\ &= 359247587.5 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

## 1. End cap Strain

$$\epsilon_{\text{end cap}} = \frac{\Delta P \cdot D}{4t \cdot E}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_E &= \frac{(33125331.67 - 3013500) \times 0.3175}{4 \times 0.01905 \times 207 \times 10^9} \\ &= 0.00060612 \end{aligned}$$

## 2. Poisson strain

$$\epsilon_{\text{poisson}} = -\frac{\nu \sigma_H}{E}$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{\nu} &= \frac{-(0.3 \times 359247587.5)}{207 \times 10^9} \\ &= -0.00052065 \end{aligned}$$

## 3. Temperatur strain

$$\epsilon_T = \alpha \cdot \Delta T$$

$$\begin{aligned} \epsilon_T &= 0.0000117 \cdot (15 - 15) \\ \epsilon_T &= 0 \end{aligned}$$

sehingga total regangan yang terjadi,

$$\epsilon_{\text{total}} = \frac{\sigma_H (1 - 2\nu)}{2E} + \alpha_T \Delta T$$

$$\epsilon_{\text{total}} = 0.000347$$

## Frictional Resistance

$$F = \mu \left[ \frac{\pi}{2} \cdot \rho_b \cdot g \cdot H_b \cdot D_i \cdot (1 + K_o) + (W_s - \rho_b \cdot g \cdot \frac{\pi \cdot D_i^2}{4}) \right]$$

Diketahui

$$\mu = 1.5$$

$$\rho_b = 1835.49 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$H_b = 0.1 \text{ m}$$

$$D_i = 0.4736 \text{ m}$$

$$W_s = 2711.099 \text{ N/m}$$

$$\pi/2 = 1.57$$

$$\begin{aligned} F &= 1.5 (1.57 \cdot 1835.49 \cdot 9.81 \cdot 0.1 \cdot 0.4736 \cdot (1+1) + (2711.1 - (1835.49 \cdot 9.81 \cdot 3.14 \cdot (0.4736^2)/4))) \\ &= 3327.605 \text{ N/m} \end{aligned}$$

# Virtual Anchor Point

Pada Hot End

$$L_A = \frac{\varepsilon_{tot} \cdot A_s \cdot E}{F}$$

Diketahui :

|                       |   |                            |
|-----------------------|---|----------------------------|
| $\varepsilon_{total}$ | = | 0.001084199                |
| $A_s$                 | = | 0.027189817 m <sup>2</sup> |
| $E$                   | = | 2.07E+11 Pa                |
| $F$                   | = | 3327.605221 N/m            |

$L_A$  = 1833.808107 m from hot end

Pada Cold End

$$L_A = \frac{\varepsilon_{tot} \cdot A_s \cdot E}{F}$$

Diketahui :

|                       |   |                            |
|-----------------------|---|----------------------------|
| $\varepsilon_{total}$ | = | 0.000347099                |
| $A_s$                 | = | 0.027189817 m <sup>2</sup> |
| $E$                   | = | 2.07E+11 Pa                |
| $F$                   | = | 3327.605221 N/m            |

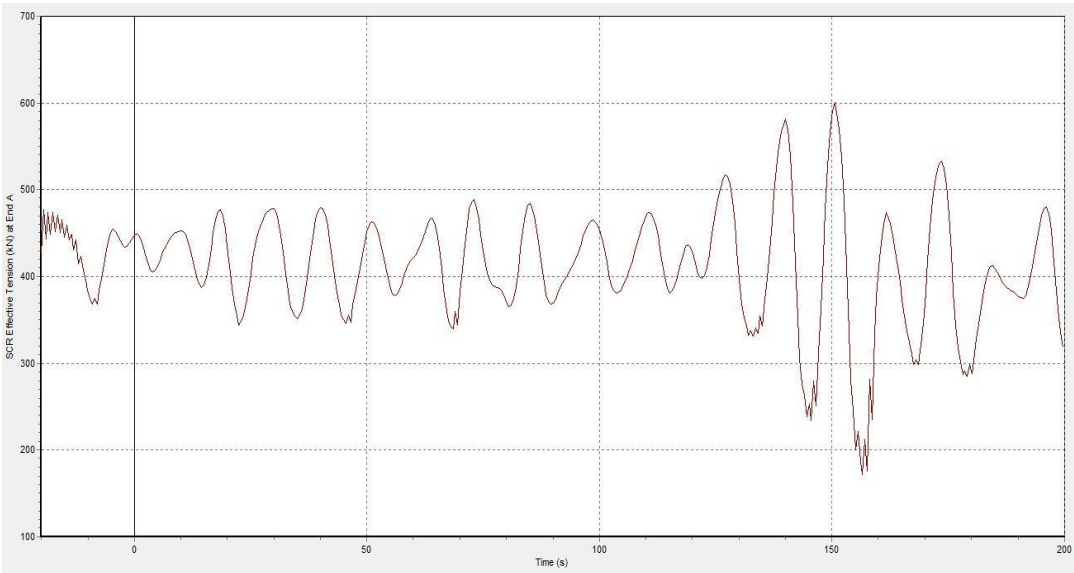
$L_A$  = 587.0814379 m from cold end

Length between virtual anchor

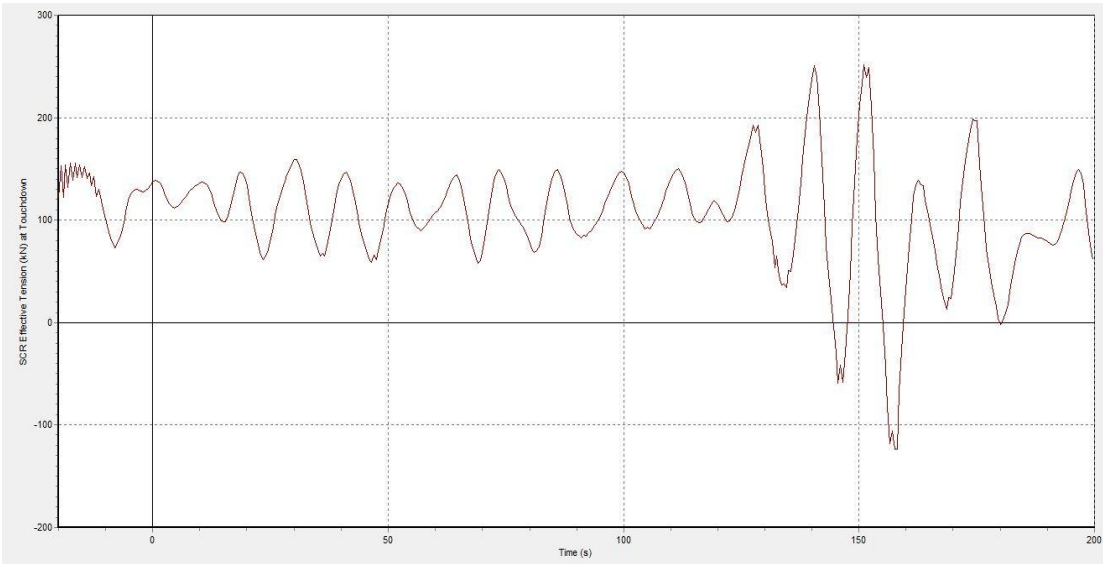
579.1105 m

# SCR Tension

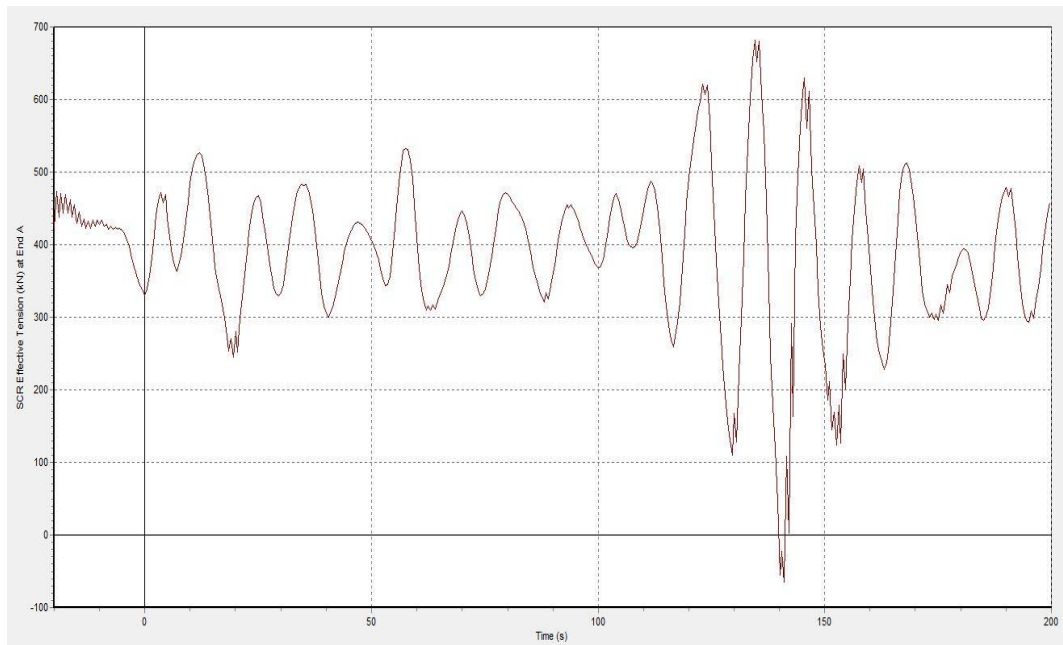
TOP TENSION 45°



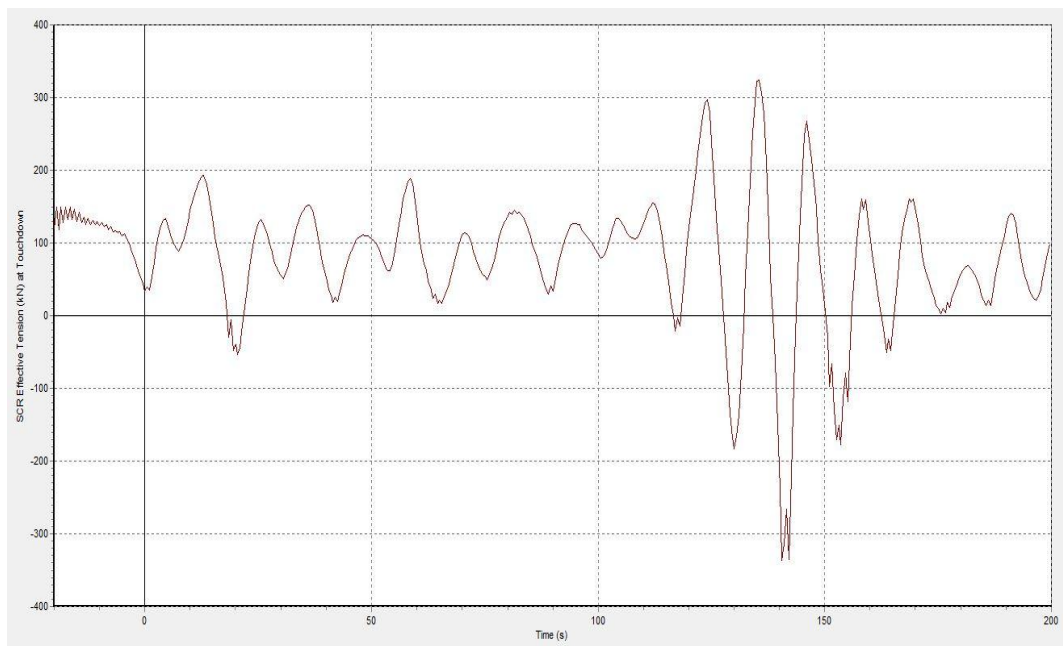
BOTTOM TENSION 45°



## TOP TENSION 90°

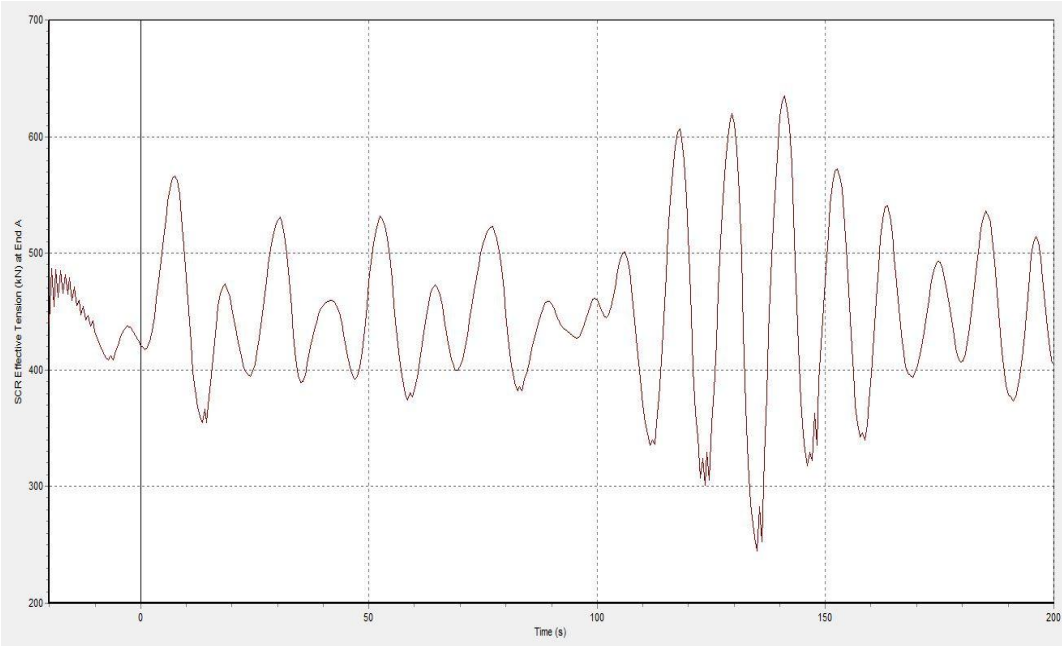


## BOTTOM TENSION 90°

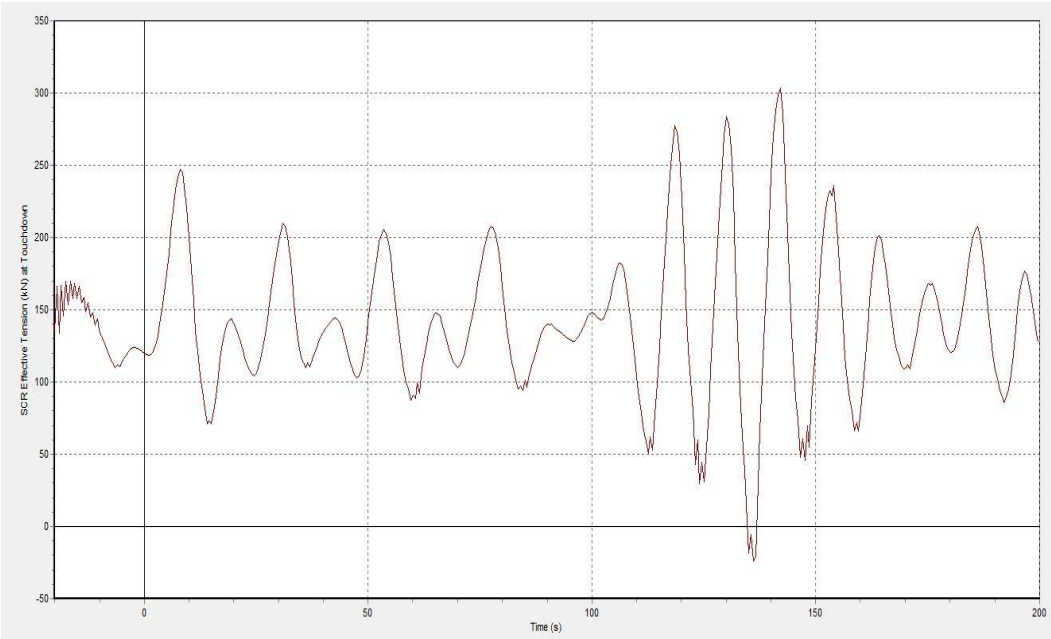




**TOP TENSION 180<sup>0</sup>**



**BOTTOM TENSION 180<sup>0</sup>**



## Rangkuman Tension

| Parameter           | 45 <sup>0</sup> | 90 <sup>0</sup> | 180 <sup>0</sup> |
|---------------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Top Tension (kN)    | 600,957         | 681,260         | 634,967          |
| Bottom Tension (kN) | 251,717         | 323,400         | 303,209          |

# Walking per Cycle

a. perubahan gaya aksial sepanjang Xab

c. perubahan regangan aksial

$$\Delta S_f = S_R - Lf$$

$$\Delta \epsilon = \frac{(\Delta S_f - \Delta P)}{EA}$$

SR = 363524.5 N  
f = 3327.605 N/m  
L = 579.1105 m  
Sf = -1563526 N

Sf = -1603651  
ΔP = -6121338  
EA = 5.63E+09  
Δε = 0.000803

b. perubahan gaya aksial sepanjang Pipa

$$\Delta P = -(p_{i,2} - p_{i,1})A_i(1 - 2\nu) - EA_s\kappa(\theta_2 - \theta_1)$$

| P1<br>(Pa) | P2<br>(Pa) | T1<br>(C) | T2<br>(C) | As<br>(m2)  | Ai<br>(m2) | v   | E<br>(Pa) | k<br>(1/C) |
|------------|------------|-----------|-----------|-------------|------------|-----|-----------|------------|
| 0          | 33125332   | 0         | 15        | 0.027189817 | 0.148883   | 0.3 | 2.07E+11  | 0.0000117  |

| W<br>(N/m) | (-)P2-P1<br>1 | 1-2v<br>2 | (1 . 2 .Ai) | E.As.k<br>1 | T2-T1<br>2 | (1 . 2) | ΔP<br>(N) |
|------------|---------------|-----------|-------------|-------------|------------|---------|-----------|
| 2711.099   | 33125332      | 0.4       | -1972723    | 65851.01864 | 63         | 4148614 | -6121338  |

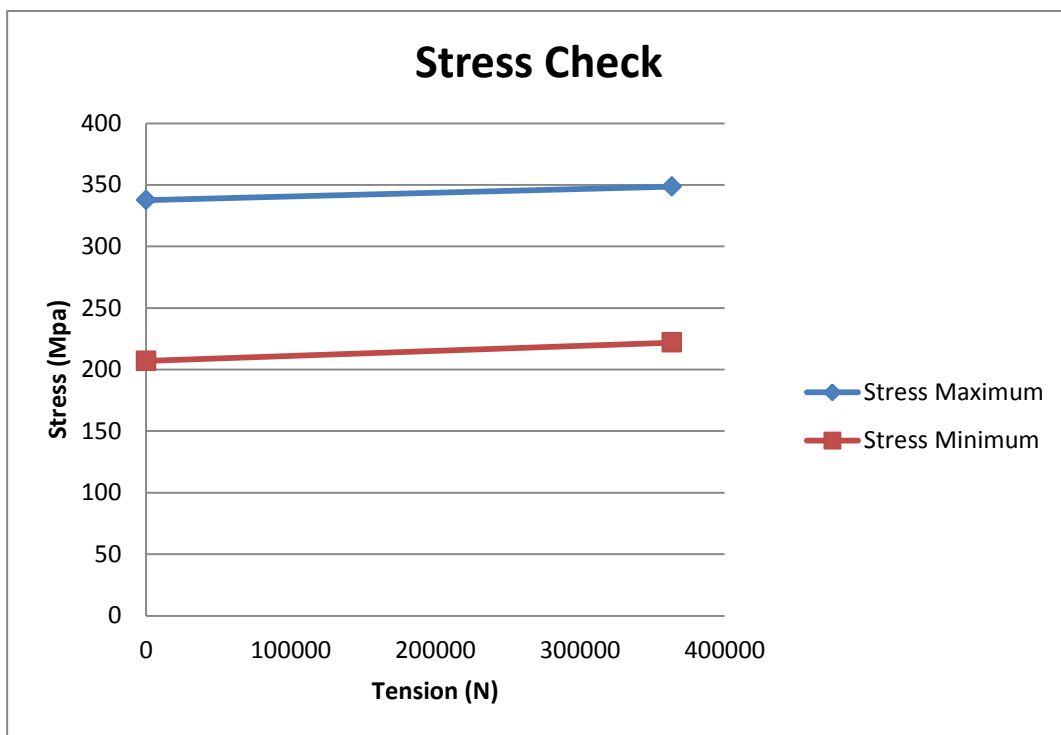
d. walking per cycle

$$\Delta_R = \frac{(|\Delta P| + S_R - fL)S_R}{EAf}$$

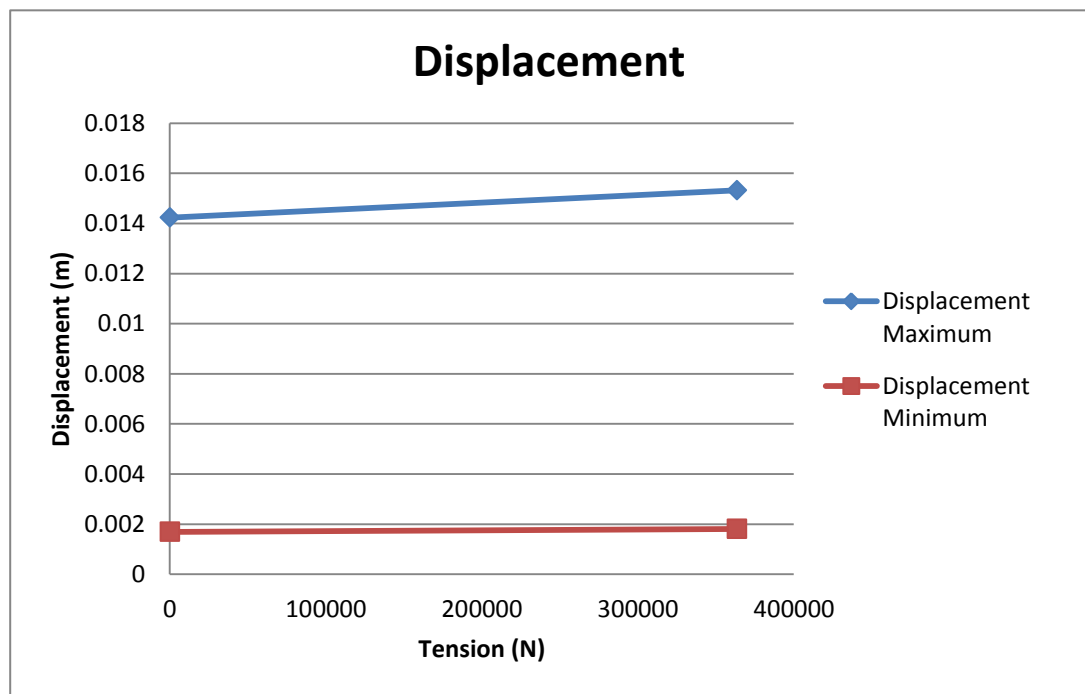
| ΔP<br>(N) | SR<br>(N) | f.L<br>(N) | E.A      | walking/cycle<br>(m) |
|-----------|-----------|------------|----------|----------------------|
| 6121338   | 323400    | 1927051    | 5.63E+09 | 0.078009534          |

## STRESS CALCULATION (ANSYS)

| Condition | SCR Tension | Equivalent Stress |        | Allowable Stress | Check |
|-----------|-------------|-------------------|--------|------------------|-------|
|           |             | Min               | Max    | 0.8 x SMYS       |       |
|           | N           | MPa               | MPa    | MPa              |       |
| 1         | 0           | 207.02            | 337.59 | 360              | OK    |
| 2         | 323400      | 220.21            | 347.35 | 360              | OK    |



| Condition | Tension | Displacement |          |
|-----------|---------|--------------|----------|
|           |         | Min          | Max      |
|           | N       | m            | m        |
| 1         | 0       | 0.0016901    | 0.014231 |
| 2         | 323400  | 0.0017938    | 0.015202 |



## CONDITION 1

| SCR<br>Tension    | Eq. Stress | Displacement | Allowable<br>Stress | Check |
|-------------------|------------|--------------|---------------------|-------|
|                   | Mpa        | m            | Mpa                 |       |
| Tanpa tension SCR | 337.59     | 0.014231     | 360                 | OK    |
|                   | 323.08     | 0.012664     |                     | OK    |
|                   | 308.57     | 0.011096     |                     | OK    |
|                   | 294.07     | 0.0095283    |                     | OK    |
|                   | 279.56     | 0.0079606    |                     | OK    |
|                   | 265.05     | 0.006393     |                     | OK    |
|                   | 250.54     | 0.0048253    |                     | OK    |
|                   | 236.04     | 0.0032577    |                     | OK    |
|                   | 221.53     | 0.0016901    |                     | OK    |
|                   | 207.02     | 0.00012242   |                     | OK    |

## CONDITION 2

| SCR<br>Tension | Eq. Stress | Displacement | Allowable<br>Stress | Check |
|----------------|------------|--------------|---------------------|-------|
|                | Mpa        | m            | Mpa                 |       |
| 323400 N       | 347.35     | 0.015202     | 360                 | OK    |
|                | 333.22     | 0.013526     |                     | OK    |
|                | 319.1      | 0.01185      |                     | OK    |
|                | 304.97     | 0.010174     |                     | OK    |
|                | 290.84     | 0.0084977    |                     | OK    |
|                | 276.72     | 0.0068218    |                     | OK    |
|                | 262.59     | 0.0051458    |                     | OK    |
|                | 248.47     | 0.0034698    |                     | OK    |
|                | 234.34     | 0.0017938    |                     | OK    |
|                | 220.21     | 0.00011787   |                     | OK    |

## STRESS CALCULATION (MANUAL)

Total longitudinal stress,  $\sigma_L$ , for axial restrained end condition, is given by

$$\sigma_L = \sigma_T + \sigma_p \pm \sigma_b \quad [14.7]$$

where

$\sigma_T$  = thermal stress,  $-E\alpha\Delta T$

$\sigma_p$  = Poisson stress,  $\nu\sigma_h$

|   |   |             |                  |
|---|---|-------------|------------------|
| Thermal stress                          | = | 188908200   | N/m <sup>2</sup> |
| Poisson stress                          | = | 107774276.3 | N/m <sup>2</sup> |
| Hoop Stress                             | = | 359247587.5 | N/m <sup>2</sup> |
| Tension Stress                          | = | 11894158.6  | N/m <sup>2</sup> |
| Longitudinal stress<br>(tanpa tension)  | = | 296682476.3 | N/m <sup>2</sup> |
| Longitudinal stress<br>(dengan tension) | = | 308576634.9 | N/m <sup>2</sup> |

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_h^2 - \sigma_l \sigma_h + 3\tau_c^2} \leq \eta_e \cdot SMYS$$

For high-pressure pipes with  $D/t$  ratios less than 20, the shear stresses are ignorable; the form of equivalent stress may be calculated and the criterion reads as

|                               |   |            |      |
|-------------------------------|---|------------|------|
| Von mises<br>(tanpa tension)  | = | 332410675  | N/m2 |
|                               | = | 332.410675 | MPa  |
| Von mises<br>(dengan tension) | = | 336783249  | N/m2 |
|                               | = | 336.78325  | MPa  |

| Von Mises (Tanpa Tension) |             | Error (%) |
|---------------------------|-------------|-----------|
| ANSYS                     | Manual      |           |
| 337.59                    | 332.4106752 | 1.55      |

| Von Mises (Dengan Tension) |            | Error (%) |
|----------------------------|------------|-----------|
| ANSYS                      | Manual     |           |
| 347.35                     | 336.783249 | 3.13      |



## Tension Maksimal (Dijinkan)

| Tension<br>(N) | Tension Stress<br>(N/m <sup>2</sup> ) | Longitudinal Stress<br>(N/m <sup>2</sup> ) | Von Mises<br>(MPa) | Allowable Stress<br>(MPa) |
|----------------|---------------------------------------|--|--------------------|---------------------------|
| 323400         | 11894158.60                           | 308576634.86                               | 336.78             | 360                       |
| 1000000        | 36778474.35                           | 333460950.61                               | 347.07             |                           |
| 1500000        | 55167711.53                           | 351850187.78                               | 355.61             |                           |
| 1700000        | 62523406.40                           | 359205882.65                               | 359.23             |                           |
| 1730000        | 63626760.63                           | 360309236.88                               | 359.78             |                           |
| 1735000        | 63810653.00                           | 360493129.26                               | 359.87             |                           |
| 1740000        | 63994545.37                           | 360677021.63                               | 359.96             |                           |
| 1741000        | 64031323.84                           | 360713800.10                               | 359.98             |                           |
| 1741500        | 64049713.08                           | 360732189.34                               | 359.99             |                           |
| 1741600        | 64053390.93                           | 360735867.19                               | 359.99             |                           |
| 1741700        | 64057068.78                           | 360739545.03                               | 360.00             |                           |
| 1741800        | 64060746.62                           | 360743222.88                               | 360.00             |                           |
| 1741900        | 64064424.47                           | 360746900.73                               | 360.00             |                           |
| 1742000        | 64068102.32                           | 360750578.58                               | 360.00             |                           |
| 1742100        | 64071780.17                           | 360754256.42                               | 360.00             |                           |
| 1742200        | 64075458.01                           | 360757934.27                               | 360.01             |                           |

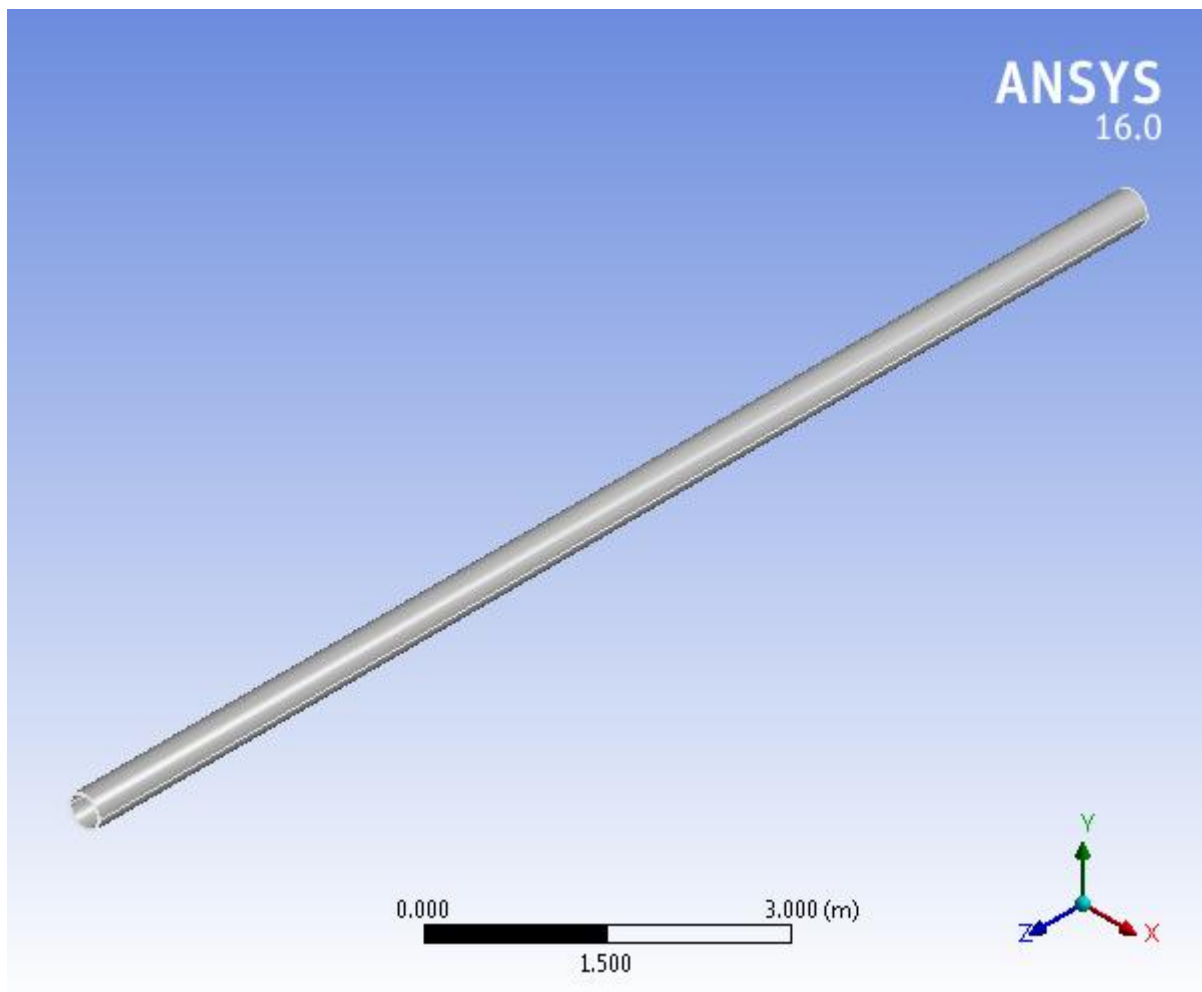
**LAMPIRAN C**

***OUTPUT* ANALISIS TEGANGAN DAN  
DISPLASMEN KONDISI 1 (ANSYS)**



### Project

|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| First Saved                  | Thursday, June 16, 2016  |
| Last Saved                   | Wednesday, June 29, 2016 |
| Product Version              | 16.0 Release             |
| Save Project Before Solution | No                       |
| Save Project After Solution  | No                       |



## Contents

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
  - [Geometry](#)
    - [Solid](#)
  - [Coordinate Systems](#)
  - [Mesh](#)
    - [Mesh Controls](#)
  - [Static Structural \(A5\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Loads](#)
    - [Solution \(A6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - [Structural Steel](#)

## Units

**TABLE 1**

| Unit System         | Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius |
|---------------------|--|
| Angle               | Degrees  |
| Rotational Velocity | rad/s  |
| Temperature         | Celsius  |

## Model (A4)

### Geometry

**TABLE 2**  
**Model (A4) > Geometry**

|                     |  |
|---------------------|--|
| Object Name         | Geometry   |
| State               | Fully Defined  |
| <b>Definition</b>   |  |
| Source              | D:\KULIAH\SKRIPSI BISMILLAH\tugas akhir doddy\ANSYS STATIC STRUCTURAL\tanpa tension\tanpa tension_files\dp0\SYSDM\SYS.agdb |
| Type                | DesignModeler  |
| Length Unit         | Meters   |
| Element Control     | Program Controlled   |
| Display Style       | Body Color   |
| <b>Bounding Box</b> |  |
| Length X            | 0.3556 m   |
| Length Y            | 0.3556 m   |
| Length Z            | 12.1 m   |
| <b>Properties</b>   |  |
| Volume              | 0.24369 m <sup>3</sup>   |
| Mass                | 1912.9 kg  |
| Scale Factor Value  | 1.   |

| Statistics                        |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Bodies                            | 1                                |
| Active Bodies                     | 1                                |
| Nodes                             | 18988                            |
| Elements                          | 2904                             |
| Mesh Metric                       | None                             |
| Basic Geometry Options            |                                  |
| Parameters                        | Yes                              |
| Parameter Key                     | DS                               |
| Attributes                        | No                               |
| Named Selections                  | No                               |
| Material Properties               | No                               |
| Advanced Geometry Options         |                                  |
| Use Associativity                 | Yes                              |
| Coordinate Systems                | No                               |
| Reader Mode Saves Updated File    | No                               |
| Use Instances                     | Yes                              |
| Smart CAD Update                  | No                               |
| Compare Parts On Update           | No                               |
| Attach File Via Temp File         | Yes                              |
| Temporary Directory               | C:\Users\Dell\AppData\Local\Temp |
| Analysis Type                     | 3-D                              |
| Decompose Disjoint Geometry       | Yes                              |
| Enclosure and Symmetry Processing | Yes                              |

**TABLE 3**  
**Model (A4) > Geometry > Parts**

| Object Name            | <i>Solid</i>              |
|------------------------|---------------------------|
| State                  | Meshed                    |
| Graphics Properties    |                           |
| Visible                | Yes                       |
| Transparency           | 1                         |
| Definition             |                           |
| Suppressed             | No                        |
| Stiffness Behavior     | Flexible                  |
| Coordinate System      | Default Coordinate System |
| Reference Temperature  | By Environment            |
| Material               |                           |
| Assignment             | Structural Steel          |
| Nonlinear Effects      | Yes                       |
| Thermal Strain Effects | Yes                       |
| Bounding Box           |                           |
| Length X               | 0.3556 m                  |
| Length Y               | 0.3556 m                  |

|                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| Length Z              | 12.1 m                   |
| <b>Properties</b>     |                          |
| Volume                | 0.24369 m <sup>3</sup>   |
| Mass                  | 1912.9 kg                |
| Centroid X            | 5.2939e-015 m            |
| Centroid Y            | 4.1843e-005 m            |
| Centroid Z            | 6.05 m                   |
| Moment of Inertia Ip1 | 23257 kg·m <sup>2</sup>  |
| Moment of Inertia Ip2 | 23257 kg·m <sup>2</sup>  |
| Moment of Inertia Ip3 | 53.826 kg·m <sup>2</sup> |
| <b>Statistics</b>     |                          |
| Nodes                 | 18988                    |
| Elements              | 2904                     |
| Mesh Metric           | None                     |

### Coordinate Systems

**TABLE 4**  
**Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System**

|                            |                                 |
|----------------------------|---------------------------------|
| Object Name                | <i>Global Coordinate System</i> |
| State                      | Fully Defined                   |
| <b>Definition</b>          |                                 |
| Type                       | Cartesian                       |
| Coordinate System ID       | 0.                              |
| <b>Origin</b>              |                                 |
| Origin X                   | 0. m                            |
| Origin Y                   | 0. m                            |
| Origin Z                   | 0. m                            |
| <b>Directional Vectors</b> |                                 |
| X Axis Data                | [ 1. 0. 0. ]                    |
| Y Axis Data                | [ 0. 1. 0. ]                    |
| Z Axis Data                | [ 0. 0. 1. ]                    |

### Mesh

**TABLE 5**  
**Model (A4) > Mesh**

|                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| Object Name                | <i>Mesh</i>     |
| State                      | Solved          |
| <b>Display</b>             |                 |
| Display Style              | Body Color      |
| <b>Defaults</b>            |                 |
| Physics Preference         | Mechanical      |
| Relevance                  | 0               |
| <b>Sizing</b>              |                 |
| Use Advanced Size Function | Off             |
| Relevance Center           | Coarse          |
| Element Size               | Default         |
| Initial Size Seed          | Active Assembly |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Smoothing                                | Medium                |
| Transition                               | Fast                  |
| Span Angle Center                        | Coarse                |
| Minimum Edge Length                      | 0.498730 m            |
| <b>Inflation</b>                         |                       |
| Use Automatic Inflation                  | None                  |
| Inflation Option                         | Smooth Transition     |
| Transition Ratio                         | 0.272                 |
| Maximum Layers                           | 5                     |
| Growth Rate                              | 1.2                   |
| Inflation Algorithm                      | Pre                   |
| View Advanced Options                    | No                    |
| <b>Patch Conforming Options</b>          |                       |
| Triangle Surface Mesher                  | Program Controlled    |
| <b>Patch Independent Options</b>         |                       |
| Topology Checking                        | No                    |
| <b>Advanced</b>                          |                       |
| Number of CPUs for Parallel Part Meshing | Program Controlled    |
| Shape Checking                           | Standard Mechanical   |
| Element Midside Nodes                    | Program Controlled    |
| Straight Sided Elements                  | No                    |
| Number of Retries                        | Default (4)           |
| Extra Retries For Assembly               | Yes                   |
| Rigid Body Behavior                      | Dimensionally Reduced |
| Mesh Morphing                            | Disabled              |
| <b>Defeaturing</b>                       |                       |
| Pinch Tolerance                          | Please Define         |
| Generate Pinch on Refresh                | No                    |
| Automatic Mesh Based Defeaturing         | On                    |
| Defeaturing Tolerance                    | Default               |
| <b>Statistics</b>                        |                       |
| Nodes                                    | 18988                 |
| Elements                                 | 2904                  |
| Mesh Metric                              | None                  |

**TABLE 6**  
**Model (A4) > Mesh > Mesh Controls**

|                       |                    |              |
|-----------------------|--------------------|--------------|
| Object Name           | Automatic Method   | Body Sizing  |
| State                 | Fully Defined      |              |
| Scope                 |                    |              |
| Scoping Method        | Geometry Selection |              |
| Geometry              | 1 Body             |              |
| Definition            |                    |              |
| Suppressed            | No                 |              |
| Method                | Automatic          |              |
| Element Midside Nodes | Use Global Setting |              |
| Type                  |                    | Element Size |
| Element Size          |                    | 0.1 m        |
| Behavior              |                    | Soft         |

## Static Structural (A5)

**TABLE 7**  
**Model (A4) > Analysis**

|                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| Object Name             | <i>Static Structural (A5)</i> |
| State                   | Solved                        |
| <b>Definition</b>       |                               |
| Physics Type            | Structural                    |
| Analysis Type           | Static Structural             |
| Solver Target           | Mechanical APDL               |
| <b>Options</b>          |                               |
| Environment Temperature | 15. °C                        |
| Generate Input Only     | No                            |

**TABLE 8**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings**

|                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| Object Name                   | <i>Analysis Settings</i> |
| State                         | Fully Defined            |
| <b>Step Controls</b>          |                          |
| Number Of Steps               | 1.                       |
| Current Step Number           | 1.                       |
| Step End Time                 | 1. s                     |
| Auto Time Stepping            | On                       |
| Define By                     | Substeps                 |
| Initial Substeps              | 50.                      |
| Minimum Substeps              | 50.                      |
| Maximum Substeps              | 100.                     |
| <b>Solver Controls</b>        |                          |
| Solver Type                   | Program Controlled       |
| Weak Springs                  | Program Controlled       |
| Solver Pivot Checking         | Program Controlled       |
| Large Deflection              | Off                      |
| Inertia Relief                | Off                      |
| <b>Restart Controls</b>       |                          |
| Generate Restart Points       | Program Controlled       |
| Retain Files After Full Solve | No                       |
| <b>Nonlinear Controls</b>     |                          |
| Newton-Raphson Option         | Program Controlled       |
| Force Convergence             | Program Controlled       |
| Moment Convergence            | Program Controlled       |
| Displacement Convergence      | Program Controlled       |
| Rotation Convergence          | Program Controlled       |
| Line Search                   | Program Controlled       |

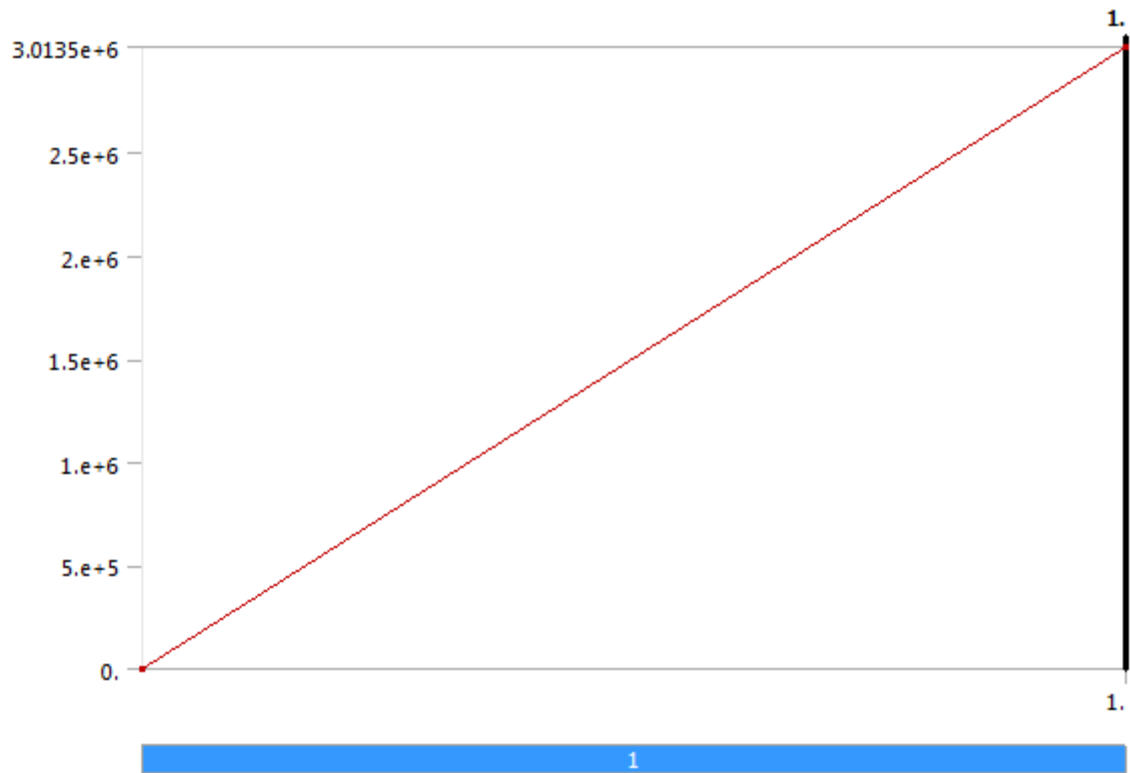


|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Stabilization                   | Off   |
| <b>Output Controls</b>          |   |
| Stress                          | Yes   |
| Strain                          | Yes   |
| Nodal Forces                    | No  |
| Contact                         | No  |
| Miscellaneous                   | No  |
| General                         | No  |
| Miscellaneous                   | No  |
| Store Results At                | All Time Points   |
| <b>Analysis Data Management</b> |   |
| Solver Files Directory          | D:\KULIAH\SKRIPSI BISMILLAH\tugas akhir doddy\ANSYS STATIC STRUCTURAL\tanpa tension\tanpa tension_files\dp0\SYS\MECH\ |
| Future Analysis                 | None  |
| Scratch Solver Files Directory  |   |
| Save MAPDL db                   | No  |
| Delete Unneeded Files           | Yes   |
| Nonlinear Solution              | No  |
| Solver Units                    | Active System   |
| Solver Unit System              | Mks   |

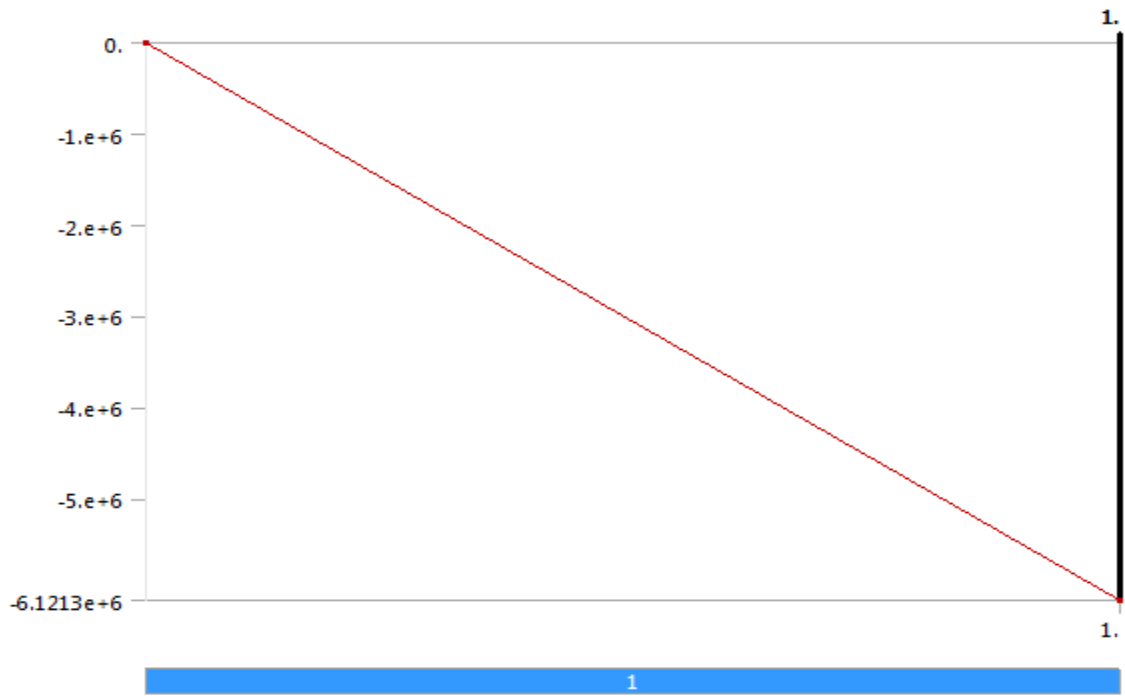
**TABLE 9**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads**

|                   |                         |                         |                              |                                 |                         |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Object Name       | Pressure external       | axial force             | boundary condition 1 (riser) | boundary condition 2 (pipeline) | Pressure Internal       |
| State             | Fully Defined           |                         |                              |                                 |                         |
| Scope             |                         |                         |                              |                                 |                         |
| Scoping Method    | Geometry Selection      |                         |                              |                                 |                         |
| Geometry          | 2 Faces                 | 1 Face                  |                              |                                 | 2 Faces                 |
| Definition        |                         |                         |                              |                                 |                         |
| Type              | Pressure                | Force                   | Displacement                 |                                 | Pressure                |
| Define By         | Normal To               | Vector                  | Components                   |                                 | Normal To               |
| Magnitude         | 3.0135e+006 Pa (ramped) | -6.1213e+006 N (ramped) |                              |                                 | 3.3125e+007 Pa (ramped) |
| Suppressed        | No                      |                         |                              |                                 |                         |
| Direction         |                         | Defined                 |                              |                                 |                         |
| Coordinate System |                         |                         | Global Coordinate System     |                                 |                         |
| X Component       |                         |                         | 0. m (ramped)                | Free                            |                         |
| Y Component       |                         |                         | 0. m (ramped)                | Free                            |                         |
| Z Component       |                         |                         | Free                         | 0. m (ramped)                   |                         |

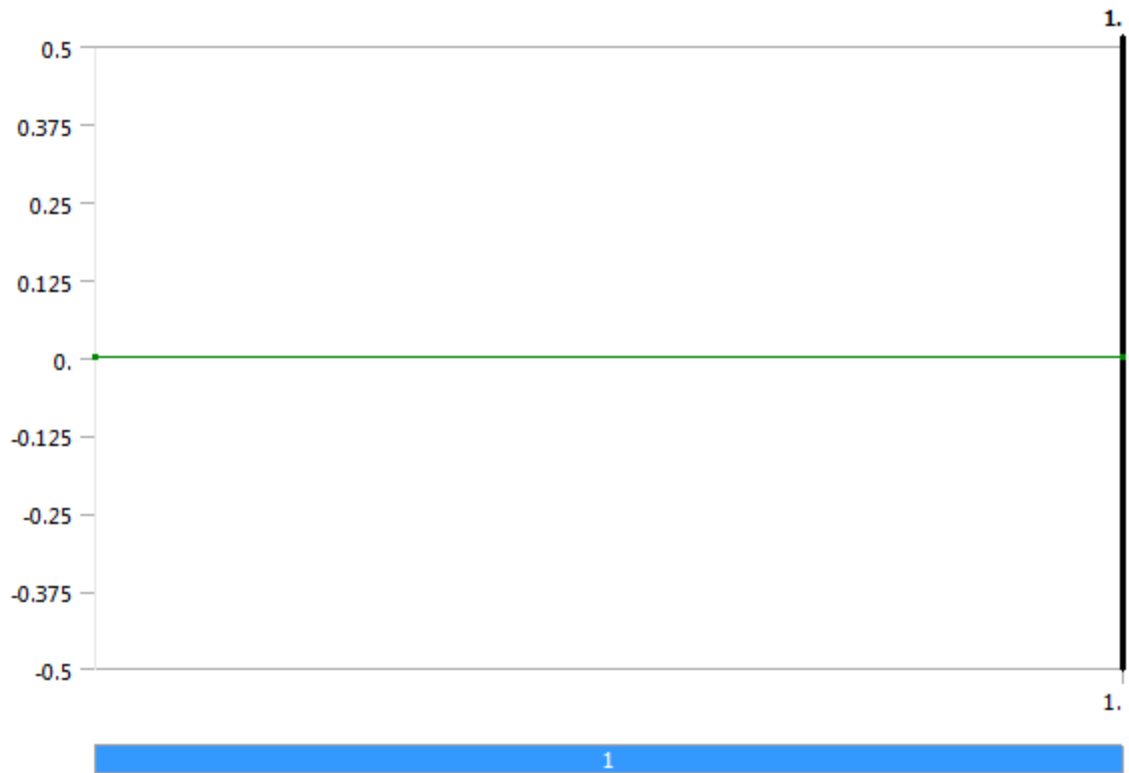
**FIGURE 1**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Pressure external**



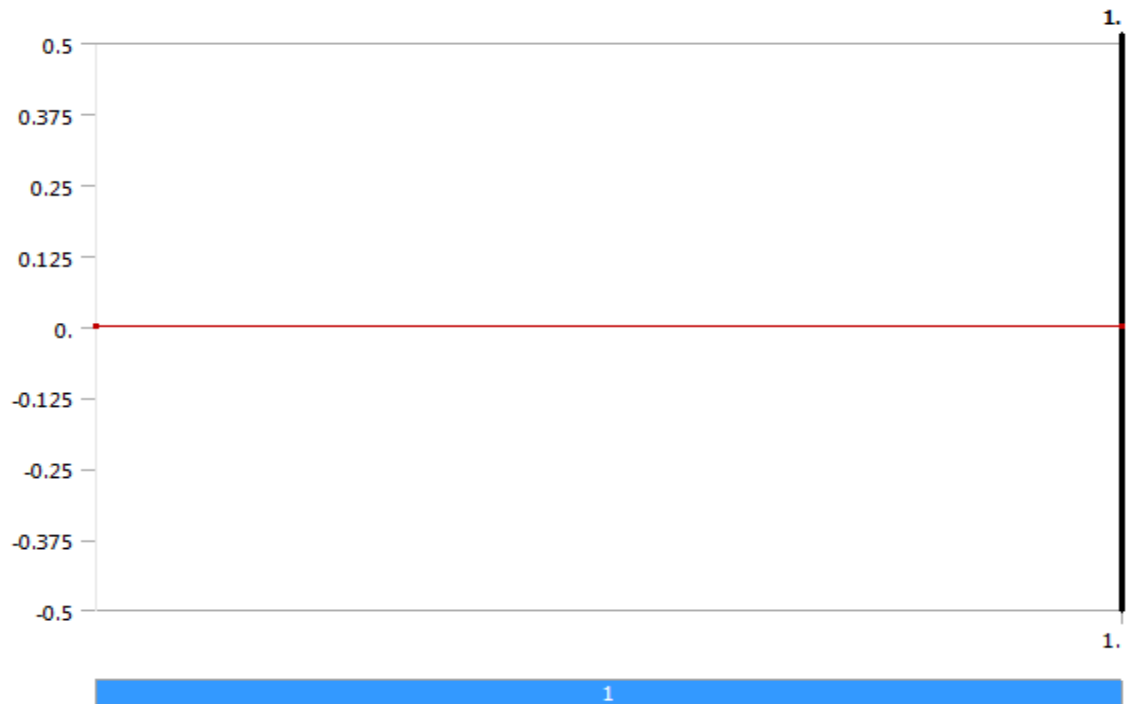
**FIGURE 2**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > axial force**



**FIGURE 3**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > boundary condition 1 (riser)**



**FIGURE 4**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > boundary condition 2 (pipeline)**



**FIGURE 5**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Pressure Internal**



*Solution (A6)*

**TABLE 10**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution**

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Object Name                     | <i>Solution (A6)</i> |
| State                           | Solved               |
| <b>Adaptive Mesh Refinement</b> |                      |
| Max Refinement Loops            | 1.                   |
| Refinement Depth                | 2.                   |
| <b>Information</b>              |                      |
| Status                          | Done                 |
| <b>Post Processing</b>          |                      |
| Calculate Beam Section Results  | No                   |

**TABLE 11**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information**

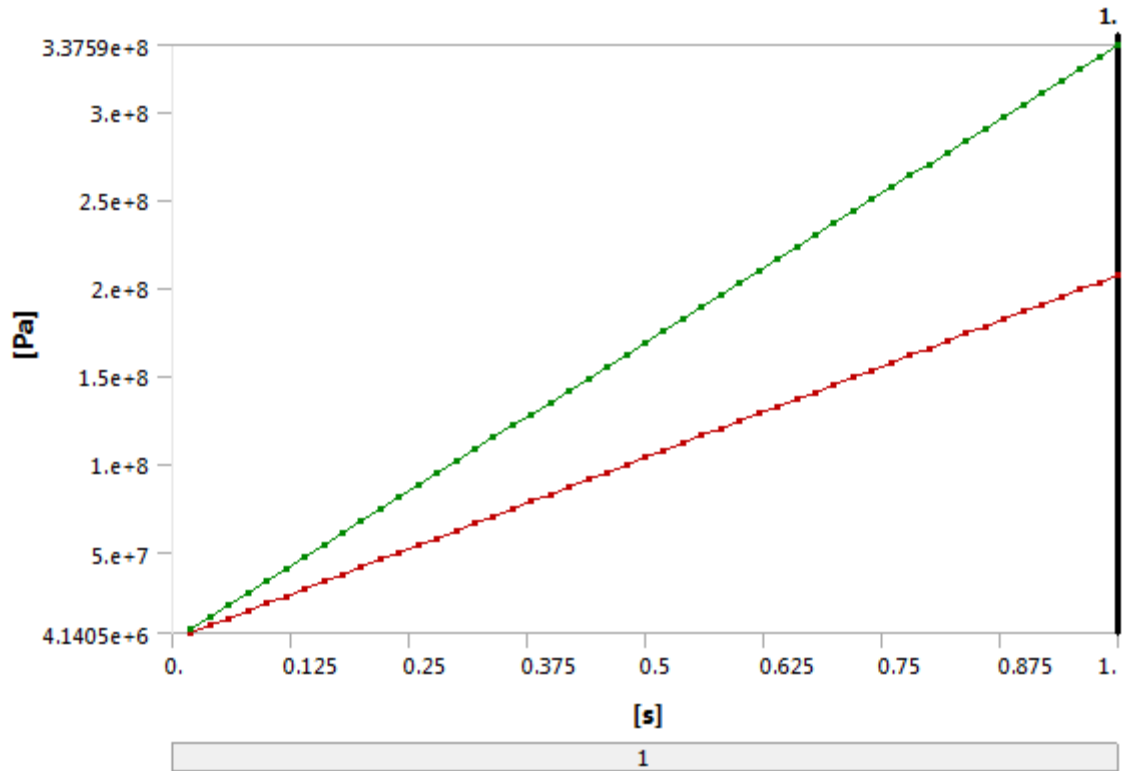
|                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Object Name                 | <i>Solution Information</i> |
| State                       | Solved                      |
| <b>Solution Information</b> |                             |
| Solution Output             | Solver Output               |
| Newton-Raphson Residuals    | 0                           |
| Update Interval             | 2.5 s                       |
| Display Points              | All                         |

| FE Connection Visibility     |                   |
|------------------------------|-------------------|
| Activate Visibility          | Yes               |
| Display                      | All FE Connectors |
| Draw Connections Attached To | All Nodes         |
| Line Color                   | Connection Type   |
| Visible on Results           | No                |
| Line Thickness               | Single            |
| Display Type                 | Lines             |

**TABLE 12**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results**

|                           |                               |                   |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Object Name               | Equivalent Stress             | Total Deformation |
| State                     | Solved                        |                   |
| Scope                     |                               |                   |
| Scoping Method            | Geometry Selection            |                   |
| Geometry                  | All Bodies                    | 1 Body            |
| Definition                |                               |                   |
| Type                      | Equivalent (von-Mises) Stress | Total Deformation |
| By                        | Time                          |                   |
| Display Time              | Last                          |                   |
| Calculate Time History    | Yes                           |                   |
| Identifier                |                               |                   |
| Suppressed                | No                            |                   |
| Integration Point Results |                               |                   |
| Display Option            | Averaged                      |                   |
| Average Across Bodies     | No                            |                   |
| Results                   |                               |                   |
| Minimum                   | 2.0702e+008 Pa                | 1.2242e-004 m     |
| Maximum                   | 3.3759e+008 Pa                | 1.4231e-002 m     |
| Minimum Value Over Time   |                               |                   |
| Minimum                   | 4.1405e+006 Pa                | 2.4483e-006 m     |
| Maximum                   | 2.0702e+008 Pa                | 1.2242e-004 m     |
| Maximum Value Over Time   |                               |                   |
| Minimum                   | 6.7517e+006 Pa                | 2.8462e-004 m     |
| Maximum                   | 3.3759e+008 Pa                | 1.4231e-002 m     |
| Information               |                               |                   |
| Time                      | 1. s                          |                   |
| Load Step                 | 1                             |                   |
| Substep                   | 50                            |                   |
| Iteration Number          | 50                            |                   |

**FIGURE 6**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

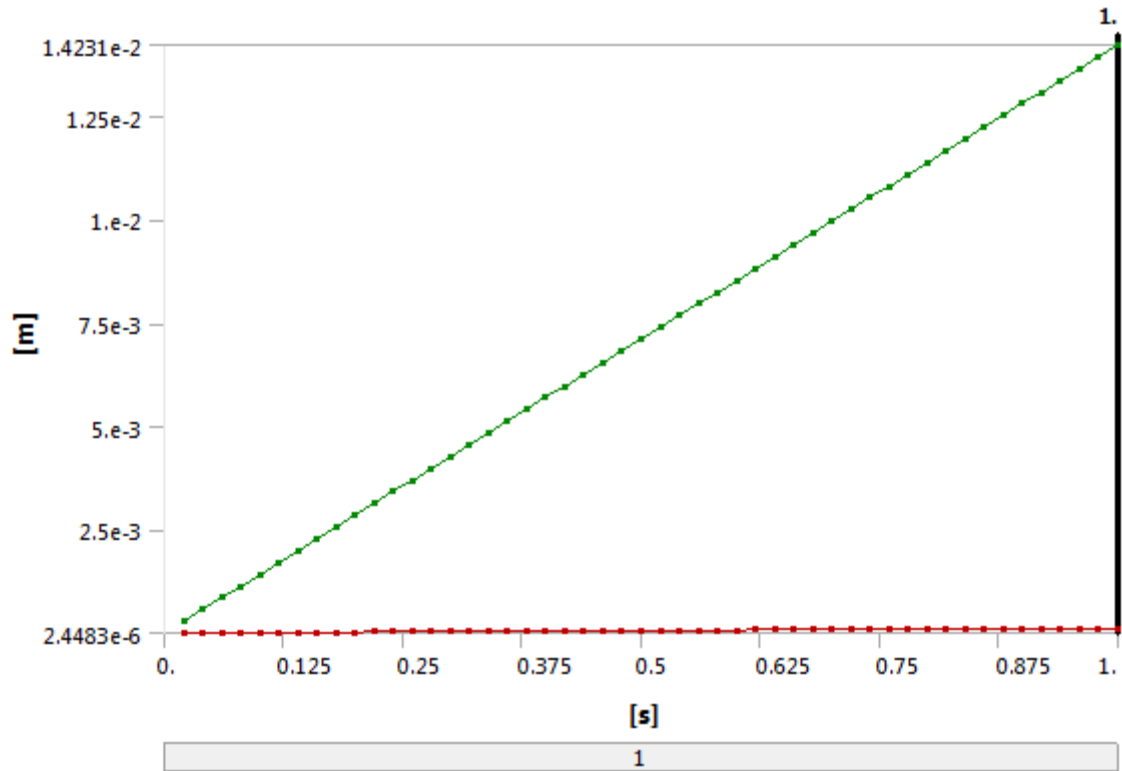


**TABLE 13**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress**

| Time [s] | Minimum [Pa] | Maximum [Pa] |
|----------|--------------|--------------|
| 2.e-002  | 4.1405e+006  | 6.7517e+006  |
| 4.e-002  | 8.2809e+006  | 1.3503e+007  |
| 6.e-002  | 1.2421e+007  | 2.0255e+007  |
| 8.e-002  | 1.6562e+007  | 2.7007e+007  |
| 0.1      | 2.0702e+007  | 3.3759e+007  |
| 0.12     | 2.4843e+007  | 4.051e+007   |
| 0.14     | 2.8983e+007  | 4.7262e+007  |
| 0.16     | 3.3124e+007  | 5.4014e+007  |
| 0.18     | 3.7264e+007  | 6.0766e+007  |
| 0.2      | 4.1405e+007  | 6.7517e+007  |
| 0.22     | 4.5545e+007  | 7.4269e+007  |
| 0.24     | 4.9685e+007  | 8.1021e+007  |
| 0.26     | 5.3826e+007  | 8.7773e+007  |
| 0.28     | 5.7966e+007  | 9.4524e+007  |
| 0.3      | 6.2107e+007  | 1.0128e+008  |
| 0.32     | 6.6247e+007  | 1.0803e+008  |
| 0.34     | 7.0388e+007  | 1.1478e+008  |
| 0.36     | 7.4528e+007  | 1.2153e+008  |
| 0.38     | 7.8669e+007  | 1.2828e+008  |
| 0.4      | 8.2809e+007  | 1.3503e+008  |

|      |             |             |
|------|-------------|-------------|
| 0.42 | 8.6949e+007 | 1.4179e+008 |
| 0.44 | 9.109e+007  | 1.4854e+008 |
| 0.46 | 9.523e+007  | 1.5529e+008 |
| 0.48 | 9.9371e+007 | 1.6204e+008 |
| 0.5  | 1.0351e+008 | 1.6879e+008 |
| 0.52 | 1.0765e+008 | 1.7555e+008 |
| 0.54 | 1.1179e+008 | 1.823e+008  |
| 0.56 | 1.1593e+008 | 1.8905e+008 |
| 0.58 | 1.2007e+008 | 1.958e+008  |
| 0.6  | 1.2421e+008 | 2.0255e+008 |
| 0.62 | 1.2835e+008 | 2.093e+008  |
| 0.64 | 1.3249e+008 | 2.1606e+008 |
| 0.66 | 1.3663e+008 | 2.2281e+008 |
| 0.68 | 1.4078e+008 | 2.2956e+008 |
| 0.7  | 1.4492e+008 | 2.3631e+008 |
| 0.72 | 1.4906e+008 | 2.4306e+008 |
| 0.74 | 1.532e+008  | 2.4981e+008 |
| 0.76 | 1.5734e+008 | 2.5657e+008 |
| 0.78 | 1.6148e+008 | 2.6332e+008 |
| 0.8  | 1.6562e+008 | 2.7007e+008 |
| 0.82 | 1.6976e+008 | 2.7682e+008 |
| 0.84 | 1.739e+008  | 2.8357e+008 |
| 0.86 | 1.7804e+008 | 2.9032e+008 |
| 0.88 | 1.8218e+008 | 2.9708e+008 |
| 0.9  | 1.8632e+008 | 3.0383e+008 |
| 0.92 | 1.9046e+008 | 3.1058e+008 |
| 0.94 | 1.946e+008  | 3.1733e+008 |
| 0.96 | 1.9874e+008 | 3.2408e+008 |
| 0.98 | 2.0288e+008 | 3.3084e+008 |
| 1.   | 2.0702e+008 | 3.3759e+008 |

**FIGURE 7**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**



**TABLE 14**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

| Time [s] | Minimum [m] | Maximum [m] |
|----------|-------------|-------------|
| 2.e-002  | 2.4483e-006 | 2.8462e-004 |
| 4.e-002  | 4.8967e-006 | 5.6925e-004 |
| 6.e-002  | 7.345e-006  | 8.5387e-004 |
| 8.e-002  | 9.7933e-006 | 1.1385e-003 |
| 0.1      | 1.2242e-005 | 1.4231e-003 |
| 0.12     | 1.469e-005  | 1.7077e-003 |
| 0.14     | 1.7138e-005 | 1.9924e-003 |
| 0.16     | 1.9587e-005 | 2.277e-003  |
| 0.18     | 2.2035e-005 | 2.5616e-003 |
| 0.2      | 2.4483e-005 | 2.8462e-003 |
| 0.22     | 2.6932e-005 | 3.1309e-003 |
| 0.24     | 2.938e-005  | 3.4155e-003 |
| 0.26     | 3.1828e-005 | 3.7001e-003 |
| 0.28     | 3.4277e-005 | 3.9847e-003 |
| 0.3      | 3.6725e-005 | 4.2694e-003 |
| 0.32     | 3.9173e-005 | 4.554e-003  |
| 0.34     | 4.1622e-005 | 4.8386e-003 |
| 0.36     | 4.407e-005  | 5.1232e-003 |
| 0.38     | 4.6518e-005 | 5.4079e-003 |
| 0.4      | 4.8967e-005 | 5.6925e-003 |



|      |             |             |
|------|-------------|-------------|
| 0.42 | 5.1415e-005 | 5.9771e-003 |
| 0.44 | 5.3863e-005 | 6.2617e-003 |
| 0.46 | 5.6312e-005 | 6.5464e-003 |
| 0.48 | 5.876e-005  | 6.831e-003  |
| 0.5  | 6.1208e-005 | 7.1156e-003 |
| 0.52 | 6.3657e-005 | 7.4002e-003 |
| 0.54 | 6.6105e-005 | 7.6849e-003 |
| 0.56 | 6.8553e-005 | 7.9695e-003 |
| 0.58 | 7.1001e-005 | 8.2541e-003 |
| 0.6  | 7.345e-005  | 8.5387e-003 |
| 0.62 | 7.5898e-005 | 8.8233e-003 |
| 0.64 | 7.8346e-005 | 9.108e-003  |
| 0.66 | 8.0795e-005 | 9.3926e-003 |
| 0.68 | 8.3243e-005 | 9.6772e-003 |
| 0.7  | 8.5691e-005 | 9.9618e-003 |
| 0.72 | 8.814e-005  | 1.0246e-002 |
| 0.74 | 9.0588e-005 | 1.0531e-002 |
| 0.76 | 9.3036e-005 | 1.0816e-002 |
| 0.78 | 9.5485e-005 | 1.11e-002   |
| 0.8  | 9.7933e-005 | 1.1385e-002 |
| 0.82 | 1.0038e-004 | 1.167e-002  |
| 0.84 | 1.0283e-004 | 1.1954e-002 |
| 0.86 | 1.0528e-004 | 1.2239e-002 |
| 0.88 | 1.0773e-004 | 1.2523e-002 |
| 0.9  | 1.1017e-004 | 1.2808e-002 |
| 0.92 | 1.1262e-004 | 1.3093e-002 |
| 0.94 | 1.1507e-004 | 1.3377e-002 |
| 0.96 | 1.1752e-004 | 1.3662e-002 |
| 0.98 | 1.1997e-004 | 1.3947e-002 |
| 1.   | 1.2242e-004 | 1.4231e-002 |

## Material Data

### Structural Steel

**TABLE 15**  
**Structural Steel > Constants**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Density                          | 7850 kg m <sup>-3</sup>                |
| Coefficient of Thermal Expansion | 1.17e-005 C <sup>-1</sup>              |
| Specific Heat                    | 434 J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Thermal Conductivity             | 60.5 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Resistivity                      | 1.7e-007 ohm m                         |

**TABLE 16**  
**Structural Steel > Compressive Ultimate Strength**

|                                  |
|----------------------------------|
| Compressive Ultimate Strength Pa |
| 5.35e+008                        |

**TABLE 17**  
**Structural Steel > Compressive Yield Strength**

| Compressive Yield Strength Pa |
|-------------------------------|
| 4.5e+008                      |

**TABLE 18**  
**Structural Steel > Tensile Yield Strength**

| Tensile Yield Strength Pa |
|---------------------------|
| 4.5e+008                  |

**TABLE 19**  
**Structural Steel > Tensile Ultimate Strength**

| Tensile Ultimate Strength Pa |
|------------------------------|
| 5.35e+008                    |

**TABLE 20**  
**Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

| Reference Temperature C |
|-------------------------|
| 15                      |

**TABLE 21**  
**Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress**

| Alternating Stress Pa | Cycles  | Mean Stress Pa |
|-----------------------|---------|----------------|
| 3.999e+009            | 10      | 0              |
| 2.827e+009            | 20      | 0              |
| 1.896e+009            | 50      | 0              |
| 1.413e+009            | 100     | 0              |
| 1.069e+009            | 200     | 0              |
| 4.41e+008             | 2000    | 0              |
| 2.62e+008             | 10000   | 0              |
| 2.14e+008             | 20000   | 0              |
| 1.38e+008             | 1.e+005 | 0              |
| 1.14e+008             | 2.e+005 | 0              |
| 8.62e+007             | 1.e+006 | 0              |

**TABLE 22**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters**

| Strength Coefficient Pa | Strength Exponent | Ductility Coefficient | Ductility Exponent | Cyclic Strength Coefficient Pa | Cyclic Strain Hardening Exponent |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 9.2e+008                | -0.106            | 0.213                 | -0.47              | 1.e+009                        | 0.2                              |

**TABLE 23**  
**Structural Steel > Isotropic Elasticity**

| Temperature C | Young's Modulus Pa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus Pa | Shear Modulus Pa |
|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|               | 2.e+011            | 0.3             | 1.6667e+011     | 7.6923e+010      |

**TABLE 24**  
**Structural Steel > Isotropic Relative Permeability**

| Relative Permeability |
|-----------------------|
| 10000                 |

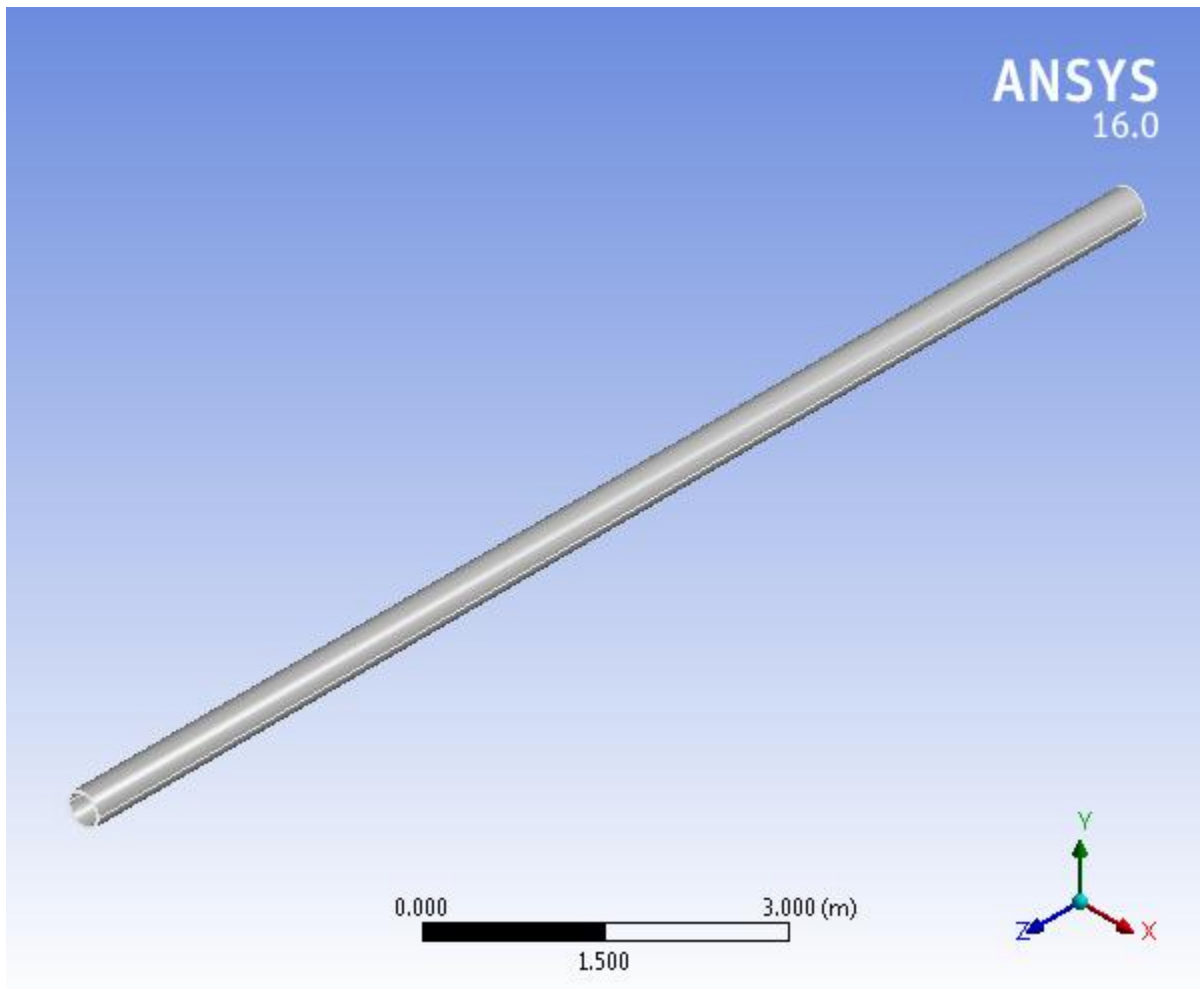
**LAMPIRAN D**

***OUTPUT* ANALISIS TEGANGAN DAN  
DISPLASMEN KONDISI 2 (ANSYS)**



## Project

|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| First Saved                  | Thursday, June 16, 2016  |
| Last Saved                   | Wednesday, June 29, 2016 |
| Product Version              | 16.0 Release             |
| Save Project Before Solution | No                       |
| Save Project After Solution  | No                       |



# Contents

- [Units](#)
- [Model \(A4\)](#)
  - [Geometry](#)
    - [Solid](#)
  - [Coordinate Systems](#)
  - [Mesh](#)
    - [Mesh Controls](#)
  - [Static Structural \(A5\)](#)
    - [Analysis Settings](#)
    - [Loads](#)
    - [Solution \(A6\)](#)
      - [Solution Information](#)
      - [Results](#)
- [Material Data](#)
  - [Structural Steel](#)

## Units

**TABLE 1**

|                     |  |
|---------------------|--|
| Unit System         | Metric (m, kg, N, s, V, A) Degrees rad/s Celsius |
| Angle               | Degrees  |
| Rotational Velocity | rad/s  |
| Temperature         | Celsius  |

## Model (A4)

### Geometry

**TABLE 2**  
**Model (A4) > Geometry**

|                     |   |
|---------------------|---|
| Object Name         | Geometry  |
| State               | Fully Defined   |
| <b>Definition</b>   |   |
| Source              | D:\KULIAH\SKRIPSI BISMILLAH\tugas akhir doddy\ANSYS STATIC STRUCTURAL\dengan tension\dengan tension_files\dp0\SYS\DM\SYS.agdb |
| Type                | DesignModeler   |
| Length Unit         | Meters  |
| Element Control     | Program Controlled  |
| Display Style       | Body Color  |
| <b>Bounding Box</b> |   |
| Length X            | 0.3556 m  |
| Length Y            | 0.3556 m  |
| Length Z            | 12.1 m  |
| <b>Properties</b>   |   |

|                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Volume                            | 0.24369 m <sup>3</sup>           |
| Mass                              | 1912.9 kg                        |
| Scale Factor Value                | 1.                               |
| <b>Statistics</b>                 |                                  |
| Bodies                            | 1                                |
| Active Bodies                     | 1                                |
| Nodes                             | 18988                            |
| Elements                          | 2904                             |
| Mesh Metric                       | None                             |
| <b>Basic Geometry Options</b>     |                                  |
| Parameters                        | Yes                              |
| Parameter Key                     | DS                               |
| Attributes                        | No                               |
| Named Selections                  | No                               |
| Material Properties               | No                               |
| <b>Advanced Geometry Options</b>  |                                  |
| Use Associativity                 | Yes                              |
| Coordinate Systems                | No                               |
| Reader Mode Saves Updated File    | No                               |
| Use Instances                     | Yes                              |
| Smart CAD Update                  | No                               |
| Compare Parts On Update           | No                               |
| Attach File Via Temp File         | Yes                              |
| Temporary Directory               | C:\Users\Dell\AppData\Local\Temp |
| Analysis Type                     | 3-D                              |
| Decompose Disjoint Geometry       | Yes                              |
| Enclosure and Symmetry Processing | Yes                              |

**TABLE 3**  
**Model (A4) > Geometry > Parts**

|                            |                           |
|----------------------------|---------------------------|
| Object Name                | <i>Solid</i>              |
| State                      | Meshed                    |
| <b>Graphics Properties</b> |                           |
| Visible                    | Yes                       |
| Transparency               | 1                         |
| <b>Definition</b>          |                           |
| Suppressed                 | No                        |
| Stiffness Behavior         | Flexible                  |
| Coordinate System          | Default Coordinate System |
| Reference Temperature      | By Environment            |
| <b>Material</b>            |                           |
| Assignment                 | Structural Steel          |
| Nonlinear Effects          | Yes                       |
| Thermal Strain Effects     | Yes                       |

| Bounding Box          |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| Length X              | 0.3556 m                 |
| Length Y              | 0.3556 m                 |
| Length Z              | 12.1 m                   |
| Properties            |                          |
| Volume                | 0.24369 m <sup>3</sup>   |
| Mass                  | 1912.9 kg                |
| Centroid X            | 5.2939e-015 m            |
| Centroid Y            | 4.1843e-005 m            |
| Centroid Z            | 6.05 m                   |
| Moment of Inertia Ip1 | 23257 kg·m <sup>2</sup>  |
| Moment of Inertia Ip2 | 23257 kg·m <sup>2</sup>  |
| Moment of Inertia Ip3 | 53.826 kg·m <sup>2</sup> |
| Statistics            |                          |
| Nodes                 | 18988                    |
| Elements              | 2904                     |
| Mesh Metric           | None                     |

## Coordinate Systems

**TABLE 4**  
**Model (A4) > Coordinate Systems > Coordinate System**

| Object Name          | <i>Global Coordinate System</i> |
|----------------------|---------------------------------|
| State                | Fully Defined                   |
| Definition           |                                 |
| Type                 | Cartesian                       |
| Coordinate System ID | 0.                              |
| Origin               |                                 |
| Origin X             | 0. m                            |
| Origin Y             | 0. m                            |
| Origin Z             | 0. m                            |
| Directional Vectors  |                                 |
| X Axis Data          | [ 1. 0. 0. ]                    |
| Y Axis Data          | [ 0. 1. 0. ]                    |
| Z Axis Data          | [ 0. 0. 1. ]                    |

## Mesh

**TABLE 5**  
**Model (A4) > Mesh**

| Object Name        | <i>Mesh</i> |
|--------------------|-------------|
| State              | Solved      |
| Display            |             |
| Display Style      | Body Color  |
| Defaults           |             |
| Physics Preference | Mechanical  |
| Relevance          | 0           |
| Sizing             |             |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| Use Advanced Size Function               | Off                   |
| Relevance Center                         | Coarse                |
| Element Size                             | Default               |
| Initial Size Seed                        | Active Assembly       |
| Smoothing                                | Medium                |
| Transition                               | Fast                  |
| Span Angle Center                        | Coarse                |
| Minimum Edge Length                      | 0.498730 m            |
| <b>Inflation</b>                         |                       |
| Use Automatic Inflation                  | None                  |
| Inflation Option                         | Smooth Transition     |
| Transition Ratio                         | 0.272                 |
| Maximum Layers                           | 5                     |
| Growth Rate                              | 1.2                   |
| Inflation Algorithm                      | Pre                   |
| View Advanced Options                    | No                    |
| <b>Patch Conforming Options</b>          |                       |
| Triangle Surface Mesher                  | Program Controlled    |
| <b>Patch Independent Options</b>         |                       |
| Topology Checking                        | No                    |
| <b>Advanced</b>                          |                       |
| Number of CPUs for Parallel Part Meshing | Program Controlled    |
| Shape Checking                           | Standard Mechanical   |
| Element Midside Nodes                    | Program Controlled    |
| Straight Sided Elements                  | No                    |
| Number of Retries                        | Default (4)           |
| Extra Retries For Assembly               | Yes                   |
| Rigid Body Behavior                      | Dimensionally Reduced |
| Mesh Morphing                            | Disabled              |
| <b>Defeaturing</b>                       |                       |
| Pinch Tolerance                          | Please Define         |
| Generate Pinch on Refresh                | No                    |
| Automatic Mesh Based Defeaturing         | On                    |
| Defeaturing Tolerance                    | Default               |
| <b>Statistics</b>                        |                       |
| Nodes                                    | 18988                 |
| Elements                                 | 2904                  |
| Mesh Metric                              | None                  |

**TABLE 6**  
**Model (A4) > Mesh > Mesh Controls**

|                |                    |             |
|----------------|--------------------|-------------|
| Object Name    | Automatic Method   | Body Sizing |
| State          | Fully Defined      |             |
| Scope          |                    |             |
| Scoping Method | Geometry Selection |             |
| Geometry       | 1 Body             |             |
| Definition     |                    |             |
| Suppressed     | No                 |             |
| Method         | Automatic          |             |



|                       |                    |              |
|-----------------------|--------------------|--------------|
| Element Midside Nodes | Use Global Setting |              |
| Type                  |                    | Element Size |
| Element Size          |                    | 0.1 m        |
| Behavior              |                    | Soft         |

## Static Structural (A5)

**TABLE 7**  
**Model (A4) > Analysis**

|                         |                               |
|-------------------------|-------------------------------|
| Object Name             | <i>Static Structural (A5)</i> |
| State                   | Solved                        |
| <b>Definition</b>       |                               |
| Physics Type            | Structural                    |
| Analysis Type           | Static Structural             |
| Solver Target           | Mechanical APDL               |
| <b>Options</b>          |                               |
| Environment Temperature | 15. °C                        |
| Generate Input Only     | No                            |

**TABLE 8**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Analysis Settings**

|                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| Object Name                   | <i>Analysis Settings</i> |
| State                         | Fully Defined            |
| <b>Step Controls</b>          |                          |
| Number Of Steps               | 1.                       |
| Current Step Number           | 1.                       |
| Step End Time                 | 1. s                     |
| Auto Time Stepping            | On                       |
| Define By                     | Substeps                 |
| Initial Substeps              | 50.                      |
| Minimum Substeps              | 50.                      |
| Maximum Substeps              | 100.                     |
| <b>Solver Controls</b>        |                          |
| Solver Type                   | Program Controlled       |
| Weak Springs                  | Program Controlled       |
| Solver Pivot Checking         | Program Controlled       |
| Large Deflection              | Off                      |
| Inertia Relief                | Off                      |
| <b>Restart Controls</b>       |                          |
| Generate Restart Points       | Program Controlled       |
| Retain Files After Full Solve | No                       |
| <b>Nonlinear Controls</b>     |                          |
| Newton-Raphson Option         | Program Controlled       |
| Force Convergence             | Program Controlled       |
| Moment                        | Program Controlled       |

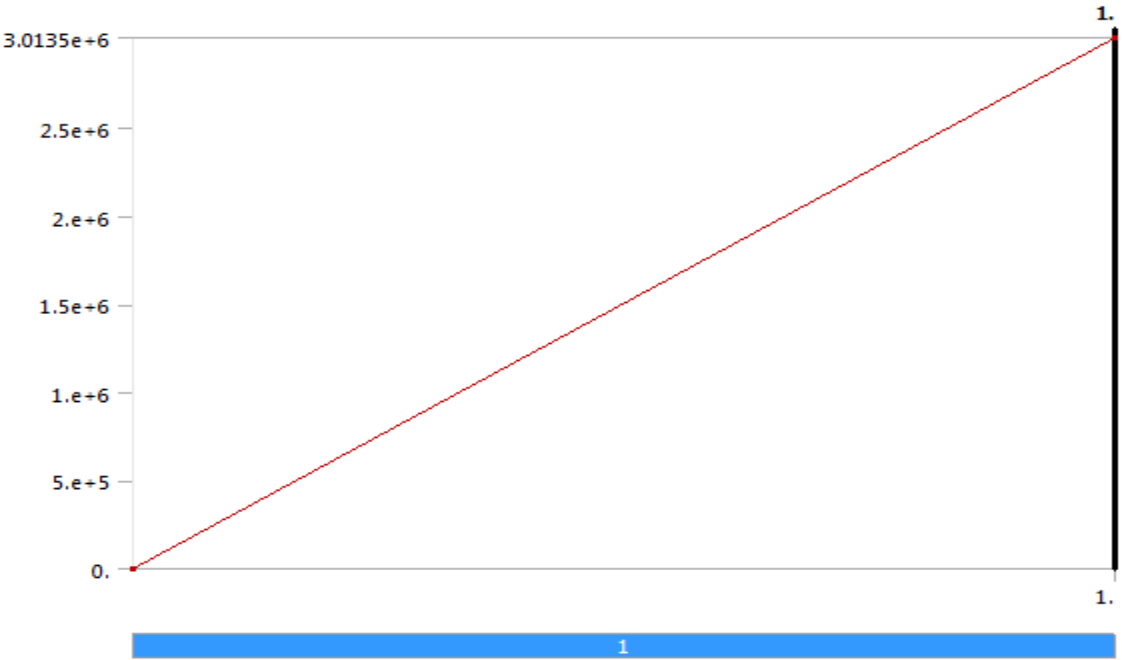
|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Convergence                       |   |
| Displacement<br>Convergence       | Program Controlled  |
| Rotation<br>Convergence           | Program Controlled  |
| Line Search                       | Program Controlled  |
| Stabilization                     | Off   |
| <b>Output Controls</b>            |   |
| Stress                            | Yes   |
| Strain                            | Yes   |
| Nodal Forces                      | No  |
| Contact<br>Miscellaneous          | No  |
| General<br>Miscellaneous          | No  |
| Store Results At                  | All Time Points   |
| <b>Analysis Data Management</b>   |   |
| Solver Files Directory            | D:\KULIAH\SKRIPSI BISMILLAH\tugas akhir doddy\ANSYS STATIC STRUCTURAL\dengan tension\dengan tension_files\dp0\SYN\MECH\ |
| Future Analysis                   | None  |
| Scratch Solver Files<br>Directory |   |
| Save MAPDL db                     | No  |
| Delete Unneeded<br>Files          | Yes   |
| Nonlinear Solution                | No  |
| Solver Units                      | Active System   |
| Solver Unit System                | mks   |

**TABLE 9**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Loads**

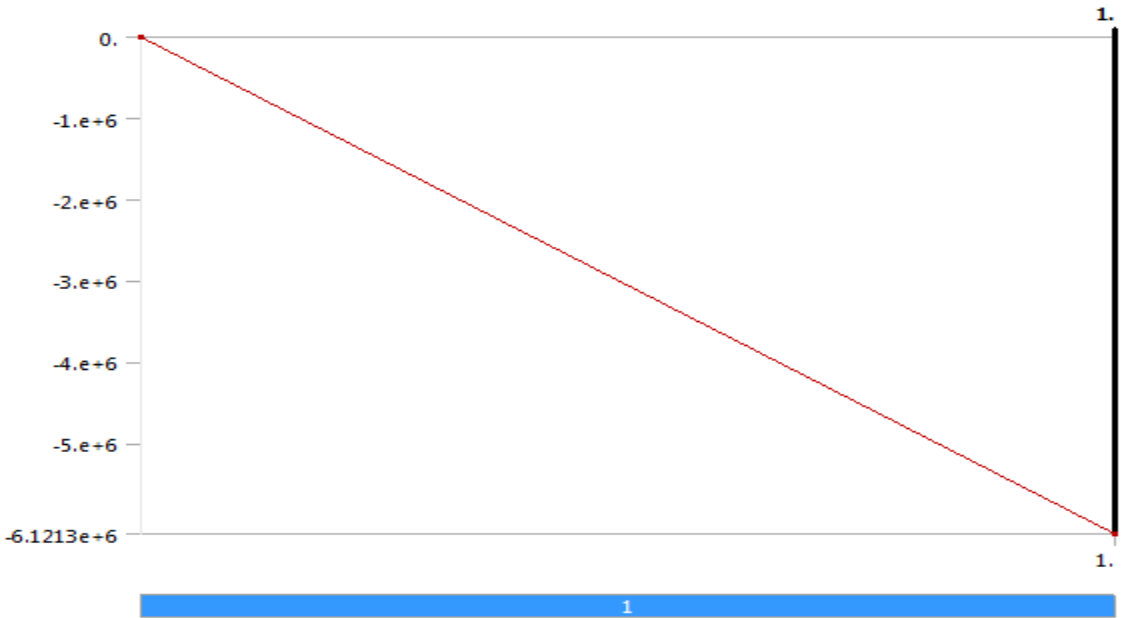
| Object Name       | <i>Pressure external</i> | <i>axial force</i>      | <i>boundary condition 1 (riser)</i> | <i>boundary condition 2 (pipeline)</i> | <i>Pressure Internal</i> | <i>tension</i>         |
|-------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--|--------------------------|------------------------|
| State             | Fully Defined            |                         |                                     |  |                          |                        |
| Scope             |                          |                         |                                     |  |                          |                        |
| Scoping Method    | Geometry Selection       |                         |                                     |  |                          |                        |
| Geometry          | 2 Faces                  | 1 Face                  |                                     |  | 2 Faces                  | 1 Face                 |
| Definition        |                          |                         |                                     |  |                          |                        |
| Type              | Pressure                 | Force                   | Displacement                        |  | Pressure                 | Force                  |
| Define By         | Normal To                | Vector                  | Components                          |  | Normal To                | Vector                 |
| Magnitude         | 3.0135e+006 Pa (ramped)  | -6.1213e+006 N (ramped) |                                     |  | 3.3125e+007 Pa (ramped)  | -3.234e+005 N (ramped) |
| Suppressed        | No                       |                         |                                     |  |                          |                        |
| Direction         |                          | Defined                 |                                     |  |                          | Defined                |
| Coordinate System |                          |                         | Global Coordinate System            |  |                          |                        |
| X Component       |                          |                         | 0. m (ramped)                       | Free                                   |                          |                        |

|                |  |                  |                  |  |
|----------------|--|------------------|------------------|--|
| Y<br>Component |  | 0. m<br>(ramped) | Free             |  |
| Z<br>Component |  | Free             | 0. m<br>(ramped) |  |

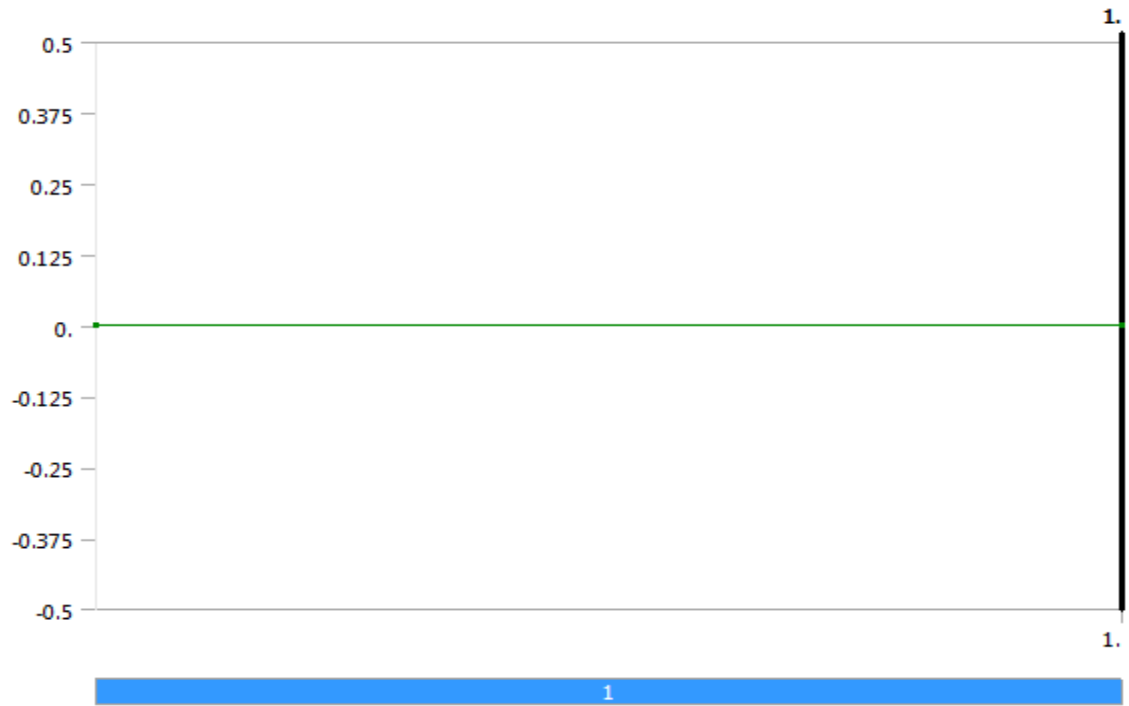
**FIGURE 1**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Pressure external**



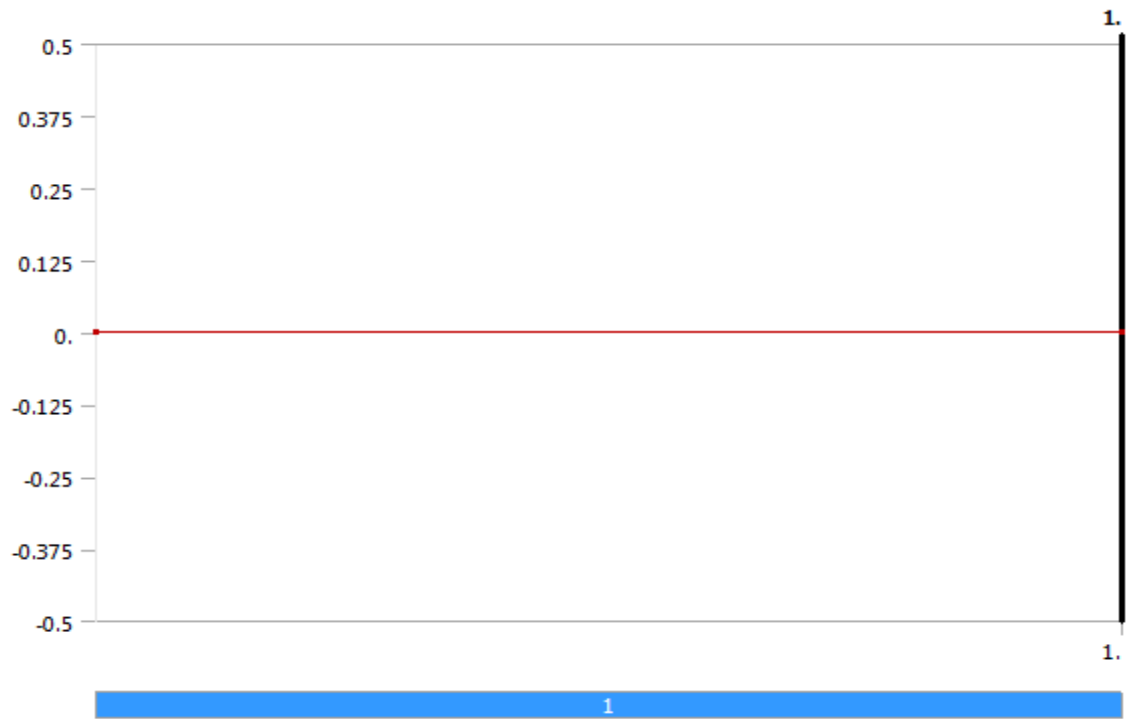
**FIGURE 2**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > axial force**



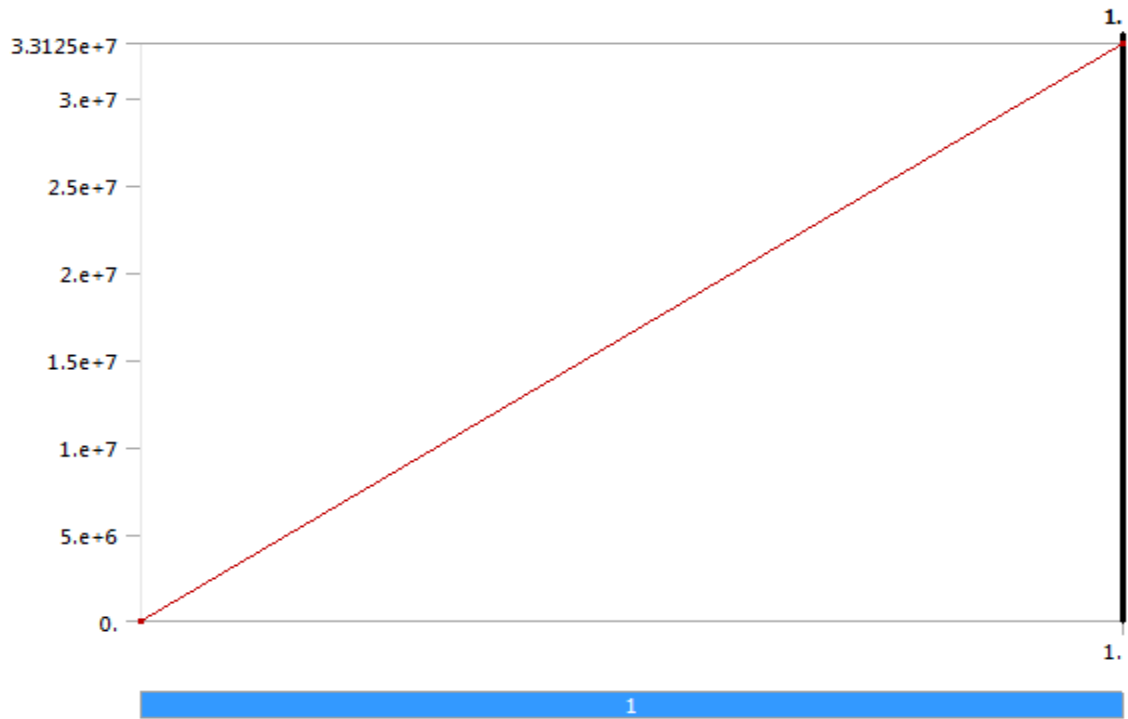
**FIGURE 3**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > boundary condition 1 (riser)**



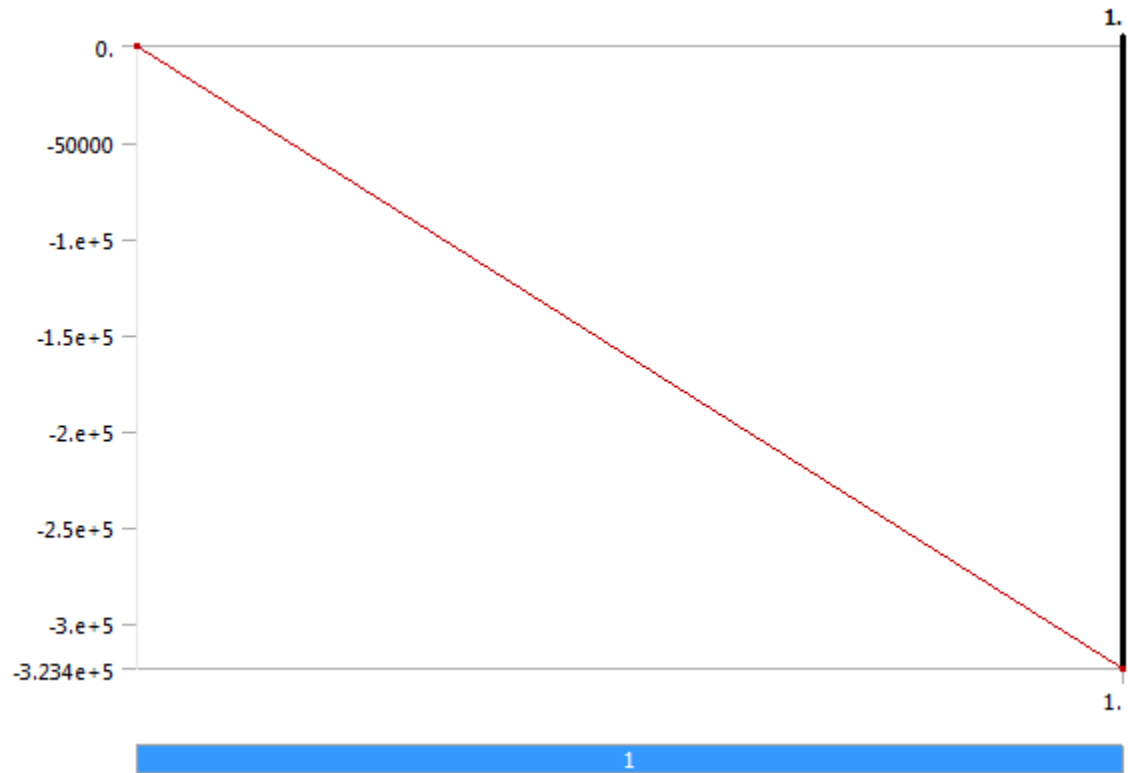
**FIGURE 4**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > boundary condition 2 (pipeline)**



**FIGURE 5**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Pressure Internal**



**FIGURE 6**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > tension**



## Solution (A6)

**TABLE 10**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution**

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Object Name                     | <i>Solution (A6)</i> |
| State                           | Solved               |
| <b>Adaptive Mesh Refinement</b> |                      |
| Max Refinement Loops            | 1.                   |
| Refinement Depth                | 2.                   |
| <b>Information</b>              |                      |
| Status                          | Done                 |
| <b>Post Processing</b>          |                      |
| Calculate Beam Section Results  | No                   |

**TABLE 11**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Solution Information**

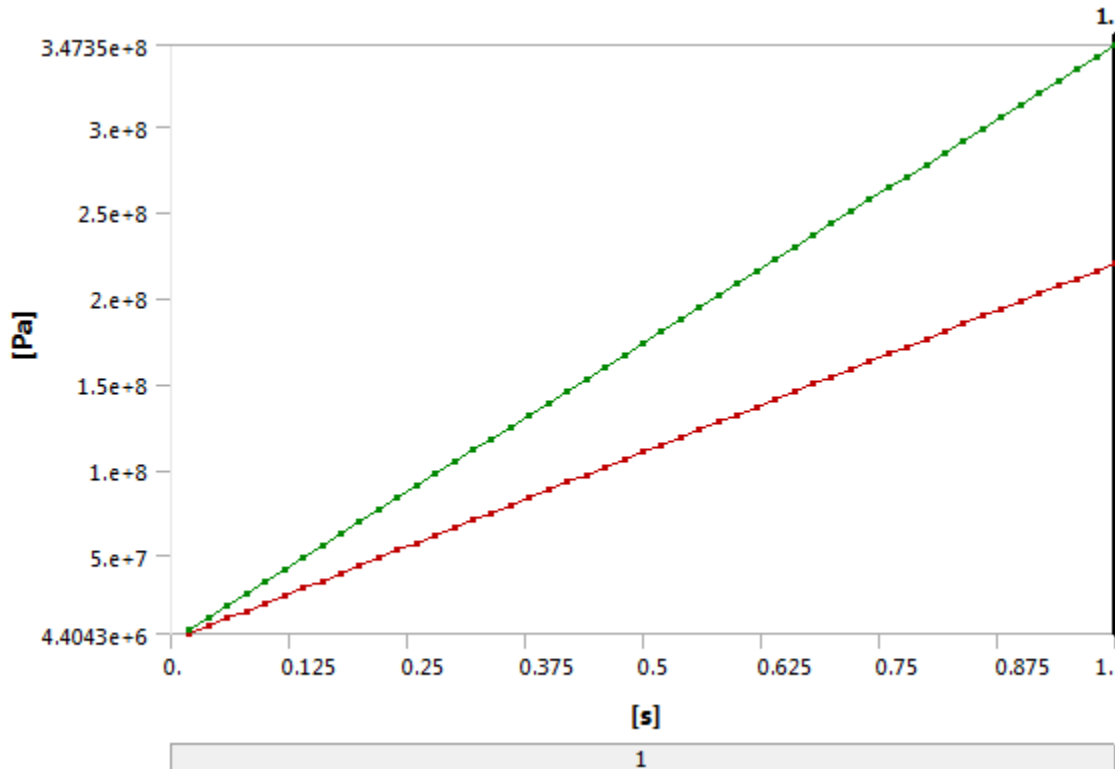
|                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| Object Name                     | <i>Solution Information</i> |
| State                           | Solved                      |
| <b>Solution Information</b>     |                             |
| Solution Output                 | Solver Output               |
| Newton-Raphson Residuals        | 0                           |
| Update Interval                 | 2.5 s                       |
| Display Points                  | All                         |
| <b>FE Connection Visibility</b> |                             |
| Activate Visibility             | Yes                         |
| Display                         | All FE Connectors           |
| Draw Connections Attached To    | All Nodes                   |
| Line Color                      | Connection Type             |
| Visible on Results              | No                          |
| Line Thickness                  | Single                      |
| Display Type                    | Lines                       |

**TABLE 12**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Results**

|                           |                               |                   |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Object Name               | Equivalent Stress             | Total Deformation |
| State                     | Solved                        |                   |
| Scope                     |                               |                   |
| Scoping Method            | Geometry Selection            |                   |
| Geometry                  | All Bodies                    | 1 Body            |
| Definition                |                               |                   |
| Type                      | Equivalent (von-Mises) Stress | Total Deformation |
| By                        | Time                          |                   |
| Display Time              | Last                          |                   |
| Calculate Time History    | Yes                           |                   |
| Identifier                |                               |                   |
| Suppressed                | No                            |                   |
| Integration Point Results |                               |                   |
| Display Option            | Averaged                      |                   |
| Average Across Bodies     | No                            |                   |

| Results                 |                |               |
|-------------------------|----------------|---------------|
| Minimum                 | 2.2021e+008 Pa | 1.1787e-004 m |
| Maximum                 | 3.4735e+008 Pa | 1.5202e-002 m |
| Minimum Value Over Time |                |               |
| Minimum                 | 4.4043e+006 Pa | 2.3574e-006 m |
| Maximum                 | 2.2021e+008 Pa | 1.1787e-004 m |
| Maximum Value Over Time |                |               |
| Minimum                 | 6.9469e+006 Pa | 3.0403e-004 m |
| Maximum                 | 3.4735e+008 Pa | 1.5202e-002 m |
| Information             |                |               |
| Time                    | 1. s           |               |
| Load Step               | 1              |               |
| Substep                 | 50             |               |
| Iteration Number        | 50             |               |

**FIGURE 7**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress



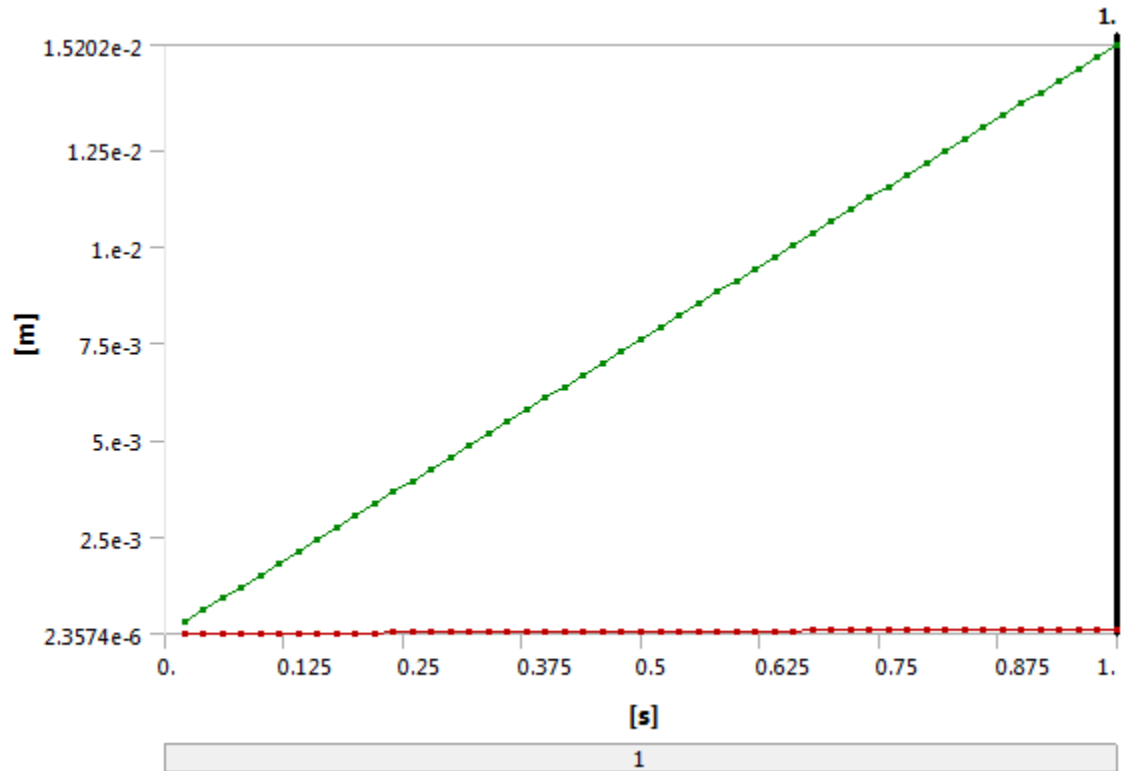
**TABLE 13**  
Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Equivalent Stress

| Time [s] | Minimum [Pa] | Maximum [Pa] |
|----------|--------------|--------------|
| 2.e-002  | 4.4043e+006  | 6.9469e+006  |
| 4.e-002  | 8.8086e+006  | 1.3894e+007  |
| 6.e-002  | 1.3213e+007  | 2.0841e+007  |
| 8.e-002  | 1.7617e+007  | 2.7788e+007  |
| 0.1      | 2.2021e+007  | 3.4735e+007  |

|      |             |             |
|------|-------------|-------------|
| 0.12 | 2.6426e+007 | 4.1682e+007 |
| 0.14 | 3.083e+007  | 4.8629e+007 |
| 0.16 | 3.5234e+007 | 5.5576e+007 |
| 0.18 | 3.9638e+007 | 6.2523e+007 |
| 0.2  | 4.4043e+007 | 6.9469e+007 |
| 0.22 | 4.8447e+007 | 7.6416e+007 |
| 0.24 | 5.2851e+007 | 8.3363e+007 |
| 0.26 | 5.7256e+007 | 9.031e+007  |
| 0.28 | 6.166e+007  | 9.7257e+007 |
| 0.3  | 6.6064e+007 | 1.042e+008  |
| 0.32 | 7.0468e+007 | 1.1115e+008 |
| 0.34 | 7.4873e+007 | 1.181e+008  |
| 0.36 | 7.9277e+007 | 1.2505e+008 |
| 0.38 | 8.3681e+007 | 1.3199e+008 |
| 0.4  | 8.8086e+007 | 1.3894e+008 |
| 0.42 | 9.249e+007  | 1.4589e+008 |
| 0.44 | 9.6894e+007 | 1.5283e+008 |
| 0.46 | 1.013e+008  | 1.5978e+008 |
| 0.48 | 1.057e+008  | 1.6673e+008 |
| 0.5  | 1.1011e+008 | 1.7367e+008 |
| 0.52 | 1.1451e+008 | 1.8062e+008 |
| 0.54 | 1.1892e+008 | 1.8757e+008 |
| 0.56 | 1.2332e+008 | 1.9451e+008 |
| 0.58 | 1.2772e+008 | 2.0146e+008 |
| 0.6  | 1.3213e+008 | 2.0841e+008 |
| 0.62 | 1.3653e+008 | 2.1536e+008 |
| 0.64 | 1.4094e+008 | 2.223e+008  |
| 0.66 | 1.4534e+008 | 2.2925e+008 |
| 0.68 | 1.4975e+008 | 2.362e+008  |
| 0.7  | 1.5415e+008 | 2.4314e+008 |
| 0.72 | 1.5855e+008 | 2.5009e+008 |
| 0.74 | 1.6296e+008 | 2.5704e+008 |
| 0.76 | 1.6736e+008 | 2.6398e+008 |
| 0.78 | 1.7177e+008 | 2.7093e+008 |
| 0.8  | 1.7617e+008 | 2.7788e+008 |
| 0.82 | 1.8058e+008 | 2.8482e+008 |
| 0.84 | 1.8498e+008 | 2.9177e+008 |
| 0.86 | 1.8938e+008 | 2.9872e+008 |
| 0.88 | 1.9379e+008 | 3.0567e+008 |
| 0.9  | 1.9819e+008 | 3.1261e+008 |
| 0.92 | 2.026e+008  | 3.1956e+008 |
| 0.94 | 2.07e+008   | 3.2651e+008 |
| 0.96 | 2.1141e+008 | 3.3345e+008 |
| 0.98 | 2.1581e+008 | 3.404e+008  |
| 1.   | 2.2021e+008 | 3.4735e+008 |



**FIGURE 8**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**



**TABLE 14**  
**Model (A4) > Static Structural (A5) > Solution (A6) > Total Deformation**

| Time [s] | Minimum [m] | Maximum [m] |
|----------|-------------|-------------|
| 2.e-002  | 2.3574e-006 | 3.0403e-004 |
| 4.e-002  | 4.7148e-006 | 6.0806e-004 |
| 6.e-002  | 7.0723e-006 | 9.121e-004  |
| 8.e-002  | 9.4297e-006 | 1.2161e-003 |
| 0.1      | 1.1787e-005 | 1.5202e-003 |
| 0.12     | 1.4145e-005 | 1.8242e-003 |
| 0.14     | 1.6502e-005 | 2.1282e-003 |
| 0.16     | 1.8859e-005 | 2.4323e-003 |
| 0.18     | 2.1217e-005 | 2.7363e-003 |
| 0.2      | 2.3574e-005 | 3.0403e-003 |
| 0.22     | 2.5932e-005 | 3.3444e-003 |
| 0.24     | 2.8289e-005 | 3.6484e-003 |
| 0.26     | 3.0646e-005 | 3.9524e-003 |
| 0.28     | 3.3004e-005 | 4.2565e-003 |
| 0.3      | 3.5361e-005 | 4.5605e-003 |
| 0.32     | 3.7719e-005 | 4.8645e-003 |
| 0.34     | 4.0076e-005 | 5.1686e-003 |
| 0.36     | 4.2434e-005 | 5.4726e-003 |
| 0.38     | 4.4791e-005 | 5.7766e-003 |
| 0.4      | 4.7148e-005 | 6.0806e-003 |

|      |             |             |
|------|-------------|-------------|
| 0.42 | 4.9506e-005 | 6.3847e-003 |
| 0.44 | 5.1863e-005 | 6.6887e-003 |
| 0.46 | 5.4221e-005 | 6.9927e-003 |
| 0.48 | 5.6578e-005 | 7.2968e-003 |
| 0.5  | 5.8935e-005 | 7.6008e-003 |
| 0.52 | 6.1293e-005 | 7.9048e-003 |
| 0.54 | 6.365e-005  | 8.2089e-003 |
| 0.56 | 6.6008e-005 | 8.5129e-003 |
| 0.58 | 6.8365e-005 | 8.8169e-003 |
| 0.6  | 7.0723e-005 | 9.121e-003  |
| 0.62 | 7.308e-005  | 9.425e-003  |
| 0.64 | 7.5437e-005 | 9.729e-003  |
| 0.66 | 7.7795e-005 | 1.0033e-002 |
| 0.68 | 8.0152e-005 | 1.0337e-002 |
| 0.7  | 8.251e-005  | 1.0641e-002 |
| 0.72 | 8.4867e-005 | 1.0945e-002 |
| 0.74 | 8.7225e-005 | 1.1249e-002 |
| 0.76 | 8.9582e-005 | 1.1553e-002 |
| 0.78 | 9.1939e-005 | 1.1857e-002 |
| 0.8  | 9.4297e-005 | 1.2161e-002 |
| 0.82 | 9.6654e-005 | 1.2465e-002 |
| 0.84 | 9.9012e-005 | 1.2769e-002 |
| 0.86 | 1.0137e-004 | 1.3073e-002 |
| 0.88 | 1.0373e-004 | 1.3377e-002 |
| 0.9  | 1.0608e-004 | 1.3681e-002 |
| 0.92 | 1.0844e-004 | 1.3985e-002 |
| 0.94 | 1.108e-004  | 1.429e-002  |
| 0.96 | 1.1316e-004 | 1.4594e-002 |
| 0.98 | 1.1551e-004 | 1.4898e-002 |
| 1.   | 1.1787e-004 | 1.5202e-002 |

## Material Data

### *Structural Steel*

**TABLE 15**  
**Structural Steel > Constants**

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| Density                          | 7850 kg m <sup>-3</sup>                |
| Coefficient of Thermal Expansion | 1.17e-005 C <sup>-1</sup>              |
| Specific Heat                    | 434 J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Thermal Conductivity             | 60.5 W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> |
| Resistivity                      | 1.7e-007 ohm m                         |

**TABLE 16**  
**Structural Steel > Compressive Ultimate Strength**

|                                  |
|----------------------------------|
| Compressive Ultimate Strength Pa |
| 5.35e+008                        |

**TABLE 17**  
**Structural Steel > Compressive Yield Strength**

| Compressive Yield Strength Pa |
|-------------------------------|
| 4.5e+008                      |

**TABLE 18**  
**Structural Steel > Tensile Yield Strength**

| Tensile Yield Strength Pa |
|---------------------------|
| 4.5e+008                  |

**TABLE 19**  
**Structural Steel > Tensile Ultimate Strength**

| Tensile Ultimate Strength Pa |
|------------------------------|
| 5.35e+008                    |

**TABLE 20**  
**Structural Steel > Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion**

| Reference Temperature C |
|-------------------------|
| 15                      |

**TABLE 21**  
**Structural Steel > Alternating Stress Mean Stress**

| Alternating Stress Pa | Cycles  | Mean Stress Pa |
|-----------------------|---------|----------------|
| 3.999e+009            | 10      | 0              |
| 2.827e+009            | 20      | 0              |
| 1.896e+009            | 50      | 0              |
| 1.413e+009            | 100     | 0              |
| 1.069e+009            | 200     | 0              |
| 4.41e+008             | 2000    | 0              |
| 2.62e+008             | 10000   | 0              |
| 2.14e+008             | 20000   | 0              |
| 1.38e+008             | 1.e+005 | 0              |
| 1.14e+008             | 2.e+005 | 0              |
| 8.62e+007             | 1.e+006 | 0              |

**TABLE 22**  
**Structural Steel > Strain-Life Parameters**

| Strength Coefficient Pa | Strength Exponent | Ductility Coefficient | Ductility Exponent | Cyclic Strength Coefficient Pa | Cyclic Strain Hardening Exponent |
|-------------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 9.2e+008                | -0.106            | 0.213                 | -0.47              | 1.e+009                        | 0.2                              |

**TABLE 23**  
**Structural Steel > Isotropic Elasticity**

| Temperature C | Young's Modulus Pa | Poisson's Ratio | Bulk Modulus Pa | Shear Modulus Pa |
|---------------|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|               | 2.e+011            | 0.3             | 1.6667e+011     | 7.6923e+010      |

**TABLE 24**  
**Structural Steel > Isotropic Relative Permeability**

| Relative Permeability |
|-----------------------|
| 10000                 |

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan analisis pada bab sebelumnya, maka ada beberapa kesimpulan yang dapat diambil antara lain:

1. Berdasarkan analisis yang telah dilakukan pada pipa bawah laut yang memiliki panjang sebesar 3 km akibat *tension steel catenary riser* dengan nilai terbesar pada arah gelombang  $90^0$  yaitu sebesar 323,400 kN dan pengaruh termal, maka didapatkan *walking per cycle* sebesar 0,078 m tiap siklusnya.
2. Hasil analisis tegangan (*equivalent stress*) dan displasmen yang terjadi pada pipa yang bersinggungan dengan *riser (hot end)* dengan menggunakan software ANSYS pada dua kondisi didapatkan nilai sebagai berikut:
  - a) Pada kondisi 1 yaitu nilai tegangan dan displasmen tidak dipengaruhi oleh *tension steel catenary riser*, namun hanya dipengaruhi oleh gaya aksial, tekanan eksternal, dan tekanan internal didapatkan nilai tegangan *equivalent* maksimal yang terjadi sebesar 337,59 MPa (ANSYS) dan 332,41 MPa (manual) dengan rasio perbedaan sebesar 1,55 %. Sesuai dengan DNV OSF 101, maka tegangan yang terjadi di bawah *allowable stress* (360 MPa), artinya pipa tersebut masih aman untuk dioperasikan dalam satu siklus. Sedangkan untuk besar displasmen maksimal yang terjadi adalah sebesar 0,014231 m menuju sumbu z negatif (sumbu pada *software*)
  - b) Pada kondisi 2 yaitu tegangan dan displasmen dipengaruhi oleh *tension steel catenary riser*, gaya aksial, tekanan eksternal, dan gaya internal. Terjadi peningkatan nilai tegangan *equivalent* maksimal dibandingkan dengan kondisi 1 diakibatkan oleh *tension steel catenary riser* yaitu sebesar 347,35 MPa (ANSYS) dan 336,78 MPa (manual) dengan rasio perbedaan sebesar 3,13 %. Sama seperti pada kondisi 1, pipa tersebut masih aman untuk dioperasikan dalam satu siklus karena nilai tegangan masih di bawah *allowable stress* (360 MPa). Sedangkan untuk displasmen maksimal yang terjadi adalah sebesar 0,015202 m menuju sumbu z negative (sumbu pada *software*).

- c) Pada kondisi 3, yaitu kondisi tambahan untuk mendapatkan nilai kritis yang terjadi pada pipa. Didapatkan nilai *tension* kritis pada penelitian ini sebesar 1742100 N dengan tegangan yang terjadi sebesar 360 MPa.

## 5.2 Saran

Ada beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut, antara lain:

1. Perlu dilakukan analisis terkait dengan *buckling* yang diakibatkan oleh *pipeline walking*.
2. Analisis *fatigue* pada struktur pipa perlu dilakukan akibat terjadinya *buckling*.
3. Mitigasi perlu dilakukan untuk menanggulangi terjadinya kegagalan pada pipa akibat *pipeline walking*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arini, H. W. 2014. *Studi Analisis “Pipeline Walking” Akibat Ekspansi Termal pada Pipa dan Pengaruhnya Terhadap Koneksi Spool*. Surabaya: Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Bai, Y. dan Q. Bai. 2005. *Subsea Pipelines and Risers*. Houston: Elsevier.
- Bai, Y. dan Q. Bai. 2014. *Subsea Pipelines Design, Analysis, and Installation*. Houston: Elsevier.
- Berhe, D. 2014. *Master’s Thesis: Controlled Lateral Buckling Design of Pipelines*. Stavanger: Faculty of Science and Technology University of Stavanger.
- Campos, L. 2001. *Nonlinear Dynamic Response of a Steel Catenary Riser at the Touch-Down Point*. Stavanger: Journal The International Offshore and Polar Engineering Conference.
- Carr, M., D. Bruton, dan D. Leslie. 2003. *Lateral Buckling and Pipeline Walking, a Challenge for Hot Pipelines*. Amsterdam: Journal Offshore Technology Conference.
- Det Norske Veritas (DNV), “*Offshore Standard DNV-OS-F101: Submarine Pipeline System*”, 2012.
- Erestio, R. C. 2016. *Tugas Akhir: Analisis Kekuatan dan Sensitivitas Steel Catenary Riser Akibat Pergerakan Semi-Submersible*. Surabaya: Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- Reza, M. 2008. *Tugas Akhir: Perancangan Pipa dan Expansion Spool Pipa Penyalur SPM*. Bandung: FTSP-ITB.
- Rong, H., R. Inglis, G. Bell, Z. Huang, and R. Chan. 2009. *Evaluation and Mitigation of Axial Walking with a Focus on Deep Water Flowlines*. Houston: Offshore Technology Conference 19862.
- Labib, F. A. 2015. *Tugas Akhir: Analisis Studi “Pipeline Walking” pada Pipa Laut Dalam dengan Variasi Kemiringan Dasar Laut*. Surabaya: Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

- Langhelle, M. B. *Master's Thesis: Pipelines for Development at Deep Water Fields*. Stavanger: Faculty of Science and Technology University of Stavanger.
- Lee, J. 2008. *Introduction to Offshore Pipeline and Risers*. Houston: Technip USA.
- Luciene A., Jose R.M., Sousa dan Gilberto B. Ellwanger. 2012. *Transient Thermal Effect and Walking with a Focus on Deep Water Flowlines*. Houston: Offshore Technology Conference.
- Soegiono. 2007. *Pipa Laut*. Surabaya: Airlangga University Press.
- Tveramo, C. 2013. *Master's Thesis: Pipeline Walking of High Pressure/Temperature Flowlines*. Trondheim: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet.
- Yoon, S.H. 2013. *Master's Thesis: Phenomenon of Pipeline Walking in High Temperature Pipeline*. Stavanger: Faculty of Science and Technology University of Stavanger.
- Isaac, O. I. 2013. *Master's Thesis: Lateral Buckling and Axial Walking of Surface Laid Subsea Pipeline*. Stavanger: Faculty of Science and Technology University of Stavanger.
- Faltinsen, O.M. 1990. *Sea Loads On Ships and Offshore Structures*. Melbourne: Cambridge University Press.

## BIODATA PENULIS



Doddy Novrianto dilahirkan di Surabaya pada tanggal 21 November 1993. Penulis merupakan anak ke-dua dari tiga bersaudara. Ia pernah mengenyam pendidikan di SMAN 2 Surabaya pada tahun 2009-2012 sebelum melanjutkan pendidikan S-1 di Teknik Kelautan FTK ITS pada tahun 2012-2016. Penulis aktif diberbagai organisasi semasa kuliahnya. Penulis pernah menjadi staff Departemen Hubungan Luar HIMATEKLA periode 2013-2014 dan Asisten Laboratorium Dinamika Struktur periode 2014-2015. Selain itu penulis juga aktif dalam beberapa kepanitiaan, penulis pernah menjadi Staff Perlengkapan OCEANO 2013, Kepala Divisi *Media Partner* OCEANO 2014, *Head of Oil Rig Design and Competition South East Asia Region* yang diadakan oleh *Society of Petroleum Engineer ITS Student Chapter* pada tahun 2015. Semasa kuliah, penulis pernah melakukan kerja praktek di perusahaan Global Maritime, BSD Tangerang Selatan. Penulis pernah tercatat sebagai penerima beasiswa yang diberikan oleh American Bureau of Shipping (ABS) pada tahun 2014. Penulis mendalami bidang *subsea pipeline* sehingga tugas akhir yang diambil berkaitan dengan bidang tersebut dan diselesaikan pada Juli 2016.